

# Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema para Detecção de Peixes Juvenis e Plâncton em Ecossistemas Aquáticos

**DIOGO SAMUEL SEIXAS BARBOSA**  
novembro de 2025

POLITÉCNICO DO PORTO  
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

---

**Desenvolvimento e Avaliação de um  
Sistema para Detecção de Peixes  
Juvenis e Plâncton em Ecossistemas  
Aquáticos**

---

**Diogo Samuel Seixas Barbosa**

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Sistemas Autónomos



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA  
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Novembro, 2025



*Esta dissertação satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Área de Especialização em Sistemas Autónomos.*

**Candidato:** Diogo Samuel Seixas Barbosa, N.º 1220592,  
1220592@isep.ipp.pt

**Orientação Científica:** Eng. Eduardo Silva, eaps@lsa.isep.ipp.pt

**Coorientação Científica:** Eng. Alfredo Martins, aom@isep.ipp.pt



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA  
Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Novembro, 2025



# Agradecimentos

Primeiro de tudo, queria agradecer ao meu orientador, Prof. Eduardo Silva e ao meu co-orientador, Prof. Alfredo Martins pela disponibilidade, paciência e participação no decorrer deste projeto. Desejo igualmente agradecer aos investigadores do Laboratório de Sistema Autónomos por me terem ajudado direta e indiretamente na concretização desta dissertação.

Quero agradecer aos meus pais pela paciência e ajuda prestada durante todos estes anos da minha vida académica. O vosso apoio ajudou nos dias difíceis para conseguir chegar até aqui.

Finalmente, quero agradecer à minha namorada e a todos os meus amigos pelo apoio, companhia e espírito de união.

Obrigado a todos!



# Resumo

A presente tese tem como objetivo o desenvolvimento e a avaliação de dois sistemas, em que engloba um sistema para a detecção eficiente de plâncton e espécies de peixes juvenis em ecossistemas aquáticos. A tecnologia proposta visa aprimorar a precisão e a eficácia das técnicas de detecção existentes, novo design do produto e oferecer modos de operação como *mooring* assim como um modo de operação autónomo.

O sistema proposto incorpora avanços em ótica, métodos de detecção e processamento de imagens para oferecer uma solução de alta resolução em tempo real. A tese abordará aspetos técnicos relacionados com a escolha da câmara, incluindo a escolha de sensores, sistema de iluminação adequados e algoritmos avançados para a identificação e classificação automatizada dos organismos mencionados.

Além disso, serão realizados testes com o sistema que irá ser validado em laboratório e testado em aplicação real no terreno.

Os resultados esperados desta pesquisa irão proporcionar uma compreensão mais abrangente e detalhada da distribuição e dinâmica do plâncton e de peixes juvenis, entre outras espécies.

**Palavras-Chave:** sistema autónomo, sistema de detecção subaquático, técnicas inovadoras de detecção



# Abstract

The aim of this thesis is to develop and evaluate two systems, including a system for the efficient detection of plankton and juvenile fish species in aquatic ecosystems. The proposed technology aims to improve the accuracy and effectiveness of existing detection techniques, redesign the product, and offer operating modes such as mooring as well as an autonomous operating mode.

The proposed system incorporates advances in optics, detection methods, and image processing to offer a high-resolution, real-time solution. The thesis will address technical aspects related to camera selection, including the choice of sensors, appropriate lighting systems, and advanced algorithms for the automated identification and classification of the aforementioned organisms.

In addition, tests will be carried out with the system, which will be validated in the laboratory and tested in real-world applications in the field.

The expected results of this research will provide a more comprehensive and detailed understanding of the distribution and dynamics of plankton and juvenile fish, among other species.

**Keywords:** autonomous system, underwater detection system, innovative detection techniques



# Índice

<b>Lista de Figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>Listagens</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Acrónimos</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização . . . . .	1
1.2 Definição do Problema . . . . .	2
1.3 Objetivos . . . . .	3
1.4 Organização da Dissertação . . . . .	4
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1 Formulação do Problema . . . . .	5
2.1.1 Fitoplâncton . . . . .	6
2.1.2 Peixes Juvenis . . . . .	17
2.1.3 Métodos e Objetivos . . . . .	18
2.2 Estado de Arte . . . . .	21
2.2.1 Introdução . . . . .	21
2.2.2 Sistemas de Aquisição de Plâncton . . . . .	21
2.2.3 Sistemas de Aquisição de Plâncton com Redes de Captação .	29
2.2.4 Sistemas de Aquisição e Identificação de Peixes . . . . .	32
2.2.5 Análise Comparativa . . . . .	36
<b>3 Fundamentos</b>	<b>41</b>
3.1 Fundamentos Óticos . . . . .	41
3.1.1 Conceitos . . . . .	41
3.1.2 Tipos de Lentes . . . . .	53
3.1.3 Iluminação . . . . .	55
<b>4 Arquitetura do Sistema</b>	<b>61</b>
4.1 Introdução . . . . .	61
4.2 Cenário de Operação . . . . .	61

4.3	Arquitetura de Alto Nível do Sistema . . . . .	64
4.3.1	<i>Hardware</i> . . . . .	64
4.3.2	<i>Software</i> . . . . .	65
4.4	Dimensionamento . . . . .	66
4.4.1	Câmaras . . . . .	66
4.4.2	Lentes . . . . .	67
4.4.3	Estudo Par Stereo do Sistema . . . . .	68
4.4.4	Iluminação . . . . .	70
4.4.5	Estrutura Mecânica . . . . .	70
<b>5</b>	<b>Implementação e Resultados</b>	<b>73</b>
5.1	Introdução . . . . .	73
5.2	Estrutura Mecânica . . . . .	73
5.2.1	Estrutura de Perfil . . . . .	74
5.2.2	Estrutura Cilíndrica das Câmaras . . . . .	75
5.2.3	Suportes . . . . .	78
5.3	<i>Hardware</i> . . . . .	79
5.4	<i>Software</i> . . . . .	80
5.4.1	SBC . . . . .	80
5.4.2	<i>Software</i> auxiliar . . . . .	82
5.5	<i>Resultados Experimentais</i> . . . . .	85
5.5.1	Calibração e Retificação do Sistema Estéreo . . . . .	85
5.5.2	Testes Laboratoriais . . . . .	88
5.5.3	Treino do modelo <i>Deep Learning</i> . . . . .	90
5.5.4	Testes em Cenário Real . . . . .	94
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>99</b>
6.1	Conclusões . . . . .	99
6.2	Trabalho Futuro . . . . .	100
	<b>Referências</b>	<b>101</b>
	<b>Anexo A</b> Desenhos da Estrutura Mecânica	<b>105</b>
	<b>Anexo B</b> Algoritmo desenvolvido para o projecto	<b>117</b>

# Lista de Figuras

1.1	Projeto MarinEye - <i>Overview</i> [3] . . . . .	2
2.1	Divisão ecológicas do oceano [5] . . . . .	7
2.2	Diferentes formas de diatomáceas marinhas: a) <i>Triceratium pentacrinus</i> - vista ventral ou valvar (cêntrica); b) <i>Actinoptychus vulgaris</i> - vista valvar (cêntrica); c) <i>Pleurosigma</i> sp. - vista valvar (penada); d) <i>Coscinodiscus granii</i> - vista lateral ou pleural (cêntrica) [5] . . . . .	8
2.3	Morfologia da célula de dinoflagelado típica, <i>Protoperidinium</i> [5] . . . . .	9
2.4	Diferentes formas de dinoflagelados. a) <i>Pyrocystis</i> sp. (célula atecada); b) <i>Ceratium tripos</i> (célula tecada); c) <i>Dinophysis tripos</i> (célula tecada); d) <i>Ornithocercus steinii</i> (célula tecada) [5] . . . . .	9
2.5	A alga <i>Emiliana huxleyi</i> só tem uma célula e é constituída por delicadas placas de carbonato de cálcio designado por cocolitoforídeos [6] . . . . .	10
2.6	Amostra de: a) <i>Isochrysis</i> ; b) <i>Phaecystis</i> [7] . . . . .	10
2.7	A <i>Dictyocha speculum</i> do Gulf of Maine USA. Fase de formação do esqueleto, identificado pela sua forma hexagonal [8] . . . . .	11
2.8	A produção primária no oceano de acordo com a sazonalidade em três latitudes distintas. A abundância relativa de luz (triângulo branco) e nutrientes (área cinza) na superfície do mar [5] . . . . .	11
2.9	Divisão de plâncton em classes e dimensões [10] . . . . .	12
2.10	Um copépode calanoide, em que podem ser vistas as duas antenas e seu cefalotórax, que é grande em comparação com o abdômen. No final do abdômen pode ser vista a furca, com os ramos caudais [11] . . . . .	13
2.11	Copépode ciclopoide fêmea com suas duas antenas moderadamente grandes, cefalotórax praticamente do mesmo tamanho que o abdômen e dois sacos ovíferos [11] . . . . .	13
2.12	Exemplos de cladóceros, demonstrando as características deste ser [12].	14
2.13	Exemplos de cladóceros [12]. . . . .	14
2.14	Exemplos de rotíferos [13]. . . . .	15
2.15	Rotífero <i>Stephanoceros fimbriatus</i> capturado usando microscopia com DIC a 100X [13] . . . . .	15

2.16	O caranguejo-aranha japonês pode apresentar até 4 metros de aberturas de pernas [14] . . . . .	16
2.17	Variedade de espécies de crustáceos [14] . . . . .	16
2.18	Exemplo de espécie: (a) medusa; (b) crustáceo [15] . . . . .	17
2.19	Localização das amostras recolhidas para o estudo [16] . . . . .	18
2.20	Desenho esquemático das etapas desde a amostragem até aos resultados [16] . . . . .	20
2.21	Representação do sistema <i>Zooglider</i> [17] . . . . .	20
2.22	Tipo de <i>mooring Zooglider</i> [17] . . . . .	21
2.23	O sistema VPRII . . . . .	22
2.24	<i>Flowchart</i> do processamento de imagens do VPRII . . . . .	23
2.25	Sistema ZOOVIS [18] . . . . .	24
2.26	Resultados do método de segmentação da ROI, (a) imagem em bruto do ZOOVIS, (b) imagem binária da abordagem MSER, (c) imagem binária da limiarização adaptativa, (d) imagem binária combinada com os objetos segmentados realçados . . . . .	25
2.27	Métodos de construção das ROI's [19] . . . . .	26
2.28	Três caixas diferentes para o sistema GUARD1. Esquerda: para utilização em profundidade até 40 m. Centro: para utilização em profundidades até 400 m. Direita: para utilização em profundidades até 10000 m [20] . . . . .	26
2.29	Esquema da arquitetura do sistema do GUARD1. As linhas vermelhas e verdes referem-se às atividades de controlo e migração de dados entre os módulos do sistema, respetivamente [20] . . . . .	27
2.30	Passos de processamento da imagem GUARD1. Da esquerda para a direita: imagem original, melhoramento da imagem imagem com CLAHE, segmentação de fundo/periferia, extração de contorno da imagem original com o operador Sobel e identificação da ROI [20] . . . . .	27
2.31	O sistema SPC: (a) Arquitetura de alto nível do sistema; (b) O sistema <i>MINI-</i> e <i>MICROSPC</i> antes duma missão [22] . . . . .	29
2.32	Especificações de <i>hardware</i> para várias versões do SPC ( <i>Scripps Plankton Camera</i> )[22] . . . . .	29
2.33	(a) Esquema do LOKI mostrando os seus principais componentes 1-4. (b) O sistema LOKI, à direita, ligado a uma estrutura para além de um amostrador tradicional de zooplâncton, durante uma operação recente no Ártico canadiano. (c) A câmara LOKI, mostrando como o plâncton passa através do canal para a captação de imagens . . . . .	31
2.34	Imagem capturada de <i>Paraeuchaeta</i> com o LOKI . . . . .	31
2.35	Câmara estereoscópica [26] . . . . .	32
2.36	<i>Flowchart</i> do método automático de análise 3D [27] . . . . .	33

2.37	Imagem Retificada ( <i>Top</i> ) Imagem original estéreo com calibração. ( <i>Bottom</i> ) Mesmas imagens estéreo mas retificadas [26] . . . . .	33
2.38	Imagem com a identificação de espécie com BB [27] . . . . .	34
2.39	Resultados da calibração [28] . . . . .	35
2.40	Resultados do modelo M2 [28] . . . . .	35
2.41	Comprimento do objeto na imagem [28] . . . . .	36
2.42	Profundidade e o comprimento correspondente do corpo [28] . . . . .	37
3.1	Exemplo do Campo de Visão (FOV) . . . . .	42
3.2	Exemplificação da Distância Focal . . . . .	42
3.3	Comparação de diferentes diafragmas . . . . .	43
3.4	Comparação entre abertura e fundo nos diafragmas . . . . .	43
3.5	Diferentes impactos na imagem relativo à exposição . . . . .	44
3.6	Impacto na imagem relativo à profundidade de campo . . . . .	44
3.7	Impacto na imagem relativo à profundidade de campo . . . . .	45
3.8	Para um determinado tamanho de sensor, H, a distância focal mais curta produz AFOV mais amplo . . . . .	46
3.9	Comparação de diferentes tamanhos de sensores . . . . .	46
3.10	Princípio da medição de distância binocular . . . . .	47
3.11	Diagrama de relação dos quatro sistemas de coordenadas . . . . .	49
3.12	Diagrama de transformação dos quatro sistemas de coordenadas . . . . .	49
3.13	Modelo de imagem subaquática [33] . . . . .	51
3.14	Diagrama da distorção causada pela refração subaquática [33] . . . . .	52
3.15	Modelo óptico de um <i>object-side telecentric lens</i> [34] . . . . .	54
3.16	Modelo óptico de um <i>image-side telecentric lens</i> [34] . . . . .	54
3.17	Modelo óptico de um <i>bi-telecentric lens</i> [34] . . . . .	55
3.18	Métodos de iluminação [35] . . . . .	56
3.19	(a) Diferentes métodos de iluminação: difusa (a) ou direta (b). (b) Exemplo de projeção sobre um alvo com <i>Front, Bright Field</i> [35] . . . . .	57
3.20	(a) Método de iluminação <i>Dark Field</i> . (b) Exemplo de projeção sobre um alvo com <i>Front, Dark Field</i> [35] . . . . .	57
3.21	Método de iluminação <i>Back, Bright Field</i> . . . . .	58
3.22	(a) Método de retro iluminação difusa. (b) Exemplo de projeção sobre um alvo com <i>Back, Bright Field</i> difusa [35] . . . . .	58
3.23	(a) Método de iluminação telecêntrica. (b) Exemplo de projeção sobre um alvo com <i>Back, Bright Field</i> telecêntrica [35] . . . . .	59
3.24	Método de iluminação <i>Back, Dark Field</i> . . . . .	59
3.25	Exemplo de inspeção com este método . . . . .	59
4.1	Perfis de alumínio . . . . .	62
4.2	Sistema de ótico da <i>Aqua-Vu</i> [37] . . . . .	63

4.3	Arquitetura de <i>hardware</i> de alto nível . . . . .	64
4.4	Arquitetura de alto nível do <i>software</i> - primeiro processo . . . . .	65
4.5	Arquitetura de alto nível do <i>software</i> - segundo processo (calibração) . . . . .	66
4.6	Arquitetura de alto nível do <i>software</i> - segundo processo (deteção e medição) . . . . .	66
4.7	Lente MVL4WA[42] escolhida para o sistema . . . . .	68
4.8	Sistema de SLS utilizado no LSA . . . . .	70
4.9	Esquema conceptual da estrutura mecânica e os componentes . . . . .	71
5.1	Modelo 3D do Sistema Completo com as câmaras, estrutura e suportes . . . . .	74
5.2	Modelo 3D da Estrutura de Perfil em Alumínio . . . . .	74
5.3	Modelos 3D da Estrutura da Câmara em duas vistas. . . . .	75
5.4	a) Modelo 3D da Tampa Inferior (vista 1); b) Modelo 3D da Tampa Inferior (vista 2) . . . . .	76
5.5	Modelo 3D do Cilindro . . . . .	76
5.6	a) Modelo 3D da Tampa Superior (vista 1); b) Modelo 3D da Tampa Superior (vista 2) . . . . .	77
5.7	a) Modelo 3D da Tampa Superior (vista 1); b) Modelo 3D da Tampa Superior (vista 2) . . . . .	77
5.8	Modelo 3D do Cilindro. . . . .	78
5.9	Modelo 3D do Cilindro . . . . .	78
5.10	<i>Hardware box</i> para controlo e alimentação do sistema . . . . .	79
5.11	Arquitetura de <i>software</i> detalhada . . . . .	80
5.12	Representação dos nós utilizados pelo <i>Package</i> da PointGrey . . . . .	80
5.13	Representação dos tópicos utilizados pelo <i>Package</i> da PointGrey . . . . .	81
5.14	Representação do nó utilizado pelo SLS . . . . .	81
5.15	Ilustração das etapas do algoritmo para retificação do <i>dataset</i> . . . . .	82
5.16	Ilustração das etapas do algoritmo para obter os parâmetros da calibração . . . . .	83
5.17	Ilustração das etapas do algoritmo para testar medidas conhecidas para validação do sistema . . . . .	83
5.18	Ilustração das etapas do algoritmo para detetar e medir automaticamente peixes juvenis . . . . .	84
5.19	<i>Chessboard</i> utilizada para a calibração . . . . .	85
5.20	Verificação do Sistema fora de água . . . . .	86
5.21	Sistema colocado dentro do tanque de água . . . . .	86
5.22	Exemplo de deteção dos pontos na <i>chessboard</i> pela <i>toolbox</i> do MATLAB . . . . .	87
5.23	Dados da calibração do sistema pelo MATLAB <i>calibration toolbox</i> . . . . .	87
5.24	Imagens não retificadas da esquerda e da direita . . . . .	88

5.25	Imagens retificadas da esquerda e da direita, com a reta da geometria epipolar . . . . .	88
5.26	Imagens retificadas da esquerda e da direita, do objeto bloco retangular . . . . .	89
5.27	Imagens retificadas da esquerda e da direita, duma caneta . . . . .	89
5.28	Imagens retificadas da esquerda e da direita, de um parafuso . . . . .	89
5.29	Gráficos de avaliação do modelo treinado no Roboflow . . . . .	91
5.30	Imagem de teste do modelo treinado com <i>Keypoint Detection</i> . . . . .	91
5.31	Gráfico de avaliação do modelo treinado YOLOV11 <i>Segmentation</i> (1) . . . . .	92
5.32	Gráfico de avaliação do modelo treinado YOLOV11 <i>Segmentation</i> (2) . . . . .	93
5.33	Imagem de teste do modelo treinado com <i>Segmentation</i> . . . . .	93
5.34	a) Localização da recolha de amostras na Marina de Leça; b) Localização da recolha de amostras na Barragem dos Pisões . . . . .	94
5.35	a) Recolha de amostras na Marina de Leça; b) Recolha de amostras na Barragem dos Pisões . . . . .	95
5.36	Colocação do sistema na água em Barragem dos Pisões . . . . .	95
5.37	Imagem capturada na Barragem de Pisões . . . . .	96
5.38	Imagem capturada na Marina de Leça . . . . .	96
5.39	Regressão linear dos peixes detetados . . . . .	97
5.40	Resultados estatísticos das medições . . . . .	98
A.1	Ilustração da Estrutura de Perfil Alumínio. . . . .	106
A.2	Medidas da Estrutura de Perfil Alumínio. . . . .	107
A.3	Ilustração da cilindro completo. . . . .	108
A.4	Medidas da Tampa Inferior. . . . .	109
A.5	Medidas do Cilindro. . . . .	110
A.6	Medidas da Tampa Superior. . . . .	111
A.7	Ilustração da Montagem Completa do Sistema. . . . .	112
A.8	Medidas da Proteção da <i>Dome</i> . . . . .	113
A.9	Medidas do Suporte da Iluminação. . . . .	114
A.10	Medidas do Suporte dos Cilindros. . . . .	115



# Lista de Tabelas

2.1	Comparação dos principais parâmetros dos sistemas de imageamento planctônico (VPRII, ZOOVIS, GUARD1 e MINI-SPC). . . . .	38
4.1	Componentes do Sistema da figura 4.3 . . . . .	65
4.2	Descrição das características das câmaras escolhidas . . . . .	67
4.3	Tabela de comparação com o sistema dimensionado para diferentes distâncias do alvo . . . . .	69
5.1	Registo dos resultados das medições e desvio-padrão . . . . .	90



# Listagens

B.1	Algoritmo de Retificação de Imagens Estéreo do dataset com MATLAB	118
B.2	Algoritmo de Extração de Parâmetros da Calibração . . . . .	119
B.3	Algoritmo de Verificação de Parâmetros da Calibração com Objetos	121
B.4	Algoritmo de Detecção e Validação de Medição Automática . . . . .	123



# Lista de Acrónimos

- AFOV** *Angular Field Of View*
- AUV** *Autonomous underwater vehicle*
- CAD** *Computer-aided Design*
- CCD** *Charge Coupled Device*
- CLAHE** *Contrast Limited Adaptive Histogram*
- CPU** *Central Processing Unit*
- DNA** *Ácido desoxirribonucleico*
- FCN** *Fully Connected Network*
- FOV** *Field Of View*
- HOG** *Histogram of Oriented Gradients*
- LED** *Light-Emitting Diode*
- LOKI** *Lightframe On-sight Keyspecies Investigation*
- LVQ** *Learning Vector Quantization*
- MSER** *Maximally Stable Extremal Regions*
- PWM** *Pulse Width Modulation*
- RNA** *Ácido Ribonucleico*
- ROI** *Region Of Interest*
- ROS** *Robot Operating System*
- ROV** *Remotly Operated Vehicle*
- SBC** *Single Board Computer*
- SGBM** *Semi-Global Block Matching*
- SLS** *Structured Light System*

**SPC** *Scripps Plankton Camera*

**SVM** *Support Vector Machine*

**USB** *Universal Serial Bus*

**VPRII** *Video Plankton Recorder*

**ZOOMIE** *Zooplankton Multiple Image Exclusion*

**ZOOVIS** *Zooplankton Visualization and Imaging System*

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização

Os ecossistemas aquáticos desempenham um papel vital na saúde do nosso planeta, sustentando uma grande variedade de vida e contribuindo significativamente para o equilíbrio ecológico global. Entre os organismos fundamentais para a saúde desses ecossistemas, o plâncton e outras espécies aquáticas desempenham um papel crucial. O plâncton, composto por organismos microscópicos que flutuam na água, serve como base da cadeia alimentar aquática, fornecendo alimento para uma ampla gama de organismos, desde pequenos peixes até grandes baleias.

Além disso, as espécies aquáticas, sejam elas macroscópicas ou microscópicas, desempenham papéis diversos nos ecossistemas aquáticos, incluindo a regulação da qualidade da água, a reciclagem de nutrientes e a manutenção do equilíbrio biológico. Portanto, compreender a distribuição e dinâmica desses organismos é essencial para monitorizar e conservar a saúde dos ecossistemas aquáticos. [1]

Diante desses desafios, surge a necessidade de desenvolver e avaliar sistemas inovadores de detecção que possam superar as limitações das abordagens tradicionais. É neste contexto que esta pesquisa se insere, buscando desenvolver um sistema que utilize tecnologias avançadas em ótica, detecção e processamento de imagens para oferecer uma solução de alta resolução em tempo real para a detecção de plâncton e outras espécies em ecossistemas aquáticos.

## 1.2 Definição do Problema

Esta dissertação surgiu no âmbito da unidade curricular Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores na área de especialização de Sistemas Autónomos do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Esta foi realizada em ambiente laboratorial no Laboratório de Sistemas Autónomos, pertencente ao Centro de Robótica e Sistemas Autónomos do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC).

Existe uma motivação forte para o desenvolvimento desta dissertação, pelo impulso científico da análise das diferentes espécies de plâncton e de peixes juvenis, entre outros, em diferentes ecossistemas marinhos. Por outro lado, visa contribuir para o desenvolvimento de técnicas de captura mais nítidas e autónomas.

Com a contribuição de vários grupos de investigação, entre os quais o INESC TEC e (CIIMAR) Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, estas instituições têm contribuído para o desenvolvimento de projetos de investigação e desenvolvimento de equipamentos, técnicas e novos estudos. Destacam-se projetos como o MarinEye e CORAL.

O MarinEye foi um desenvolvimento de um sistema autónomo para a monitorização marinha integrada física-química e biológica. O principal objetivo deste projeto foi avanços no sistema de monitorização autónomo multi-trófico capaz de aquisição de dados biológicos com a mesma resolução *spatio-temporal* dos dados físicos e químicos, de forma a avaliar a biodiversidade e a estabilidade de um ecossistema [2].

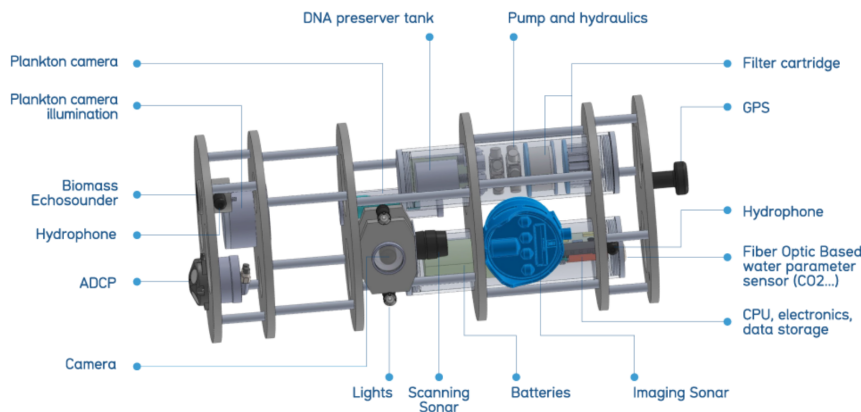


Figura 1.1: Projeto MarinEye - *Overview* [3]

Conforme observado na Figura 1.1, é apresentado um sistema com um conjunto de sensores de parâmetros da água, um sistema de fração de filtração da água para amostragem de RNA/DNA, sistema de imagiologia do plâncton e um sistema acústico para registo de ambiente, biomassa e medições de abundância e diversidade.

O projeto CORAL "*Sustainable Ocean Exploitation: Tools and Sensors (2016-2018)*" teve em vista as perspetivas da exploração mineira em mar profundo na

plataforma continental portuguesa e os impactos ambientais esperados. O projeto juntou o INES TEC e o CIIMAR na exploração do mar profundo, o objetivo era investigar e desenvolver soluções tecnológicas para a exploração dos recursos do mar profundo num ambiente sustentável. A estratégia implementada foi através de duas investigações [4]:

- **BlueTools** - ferramentas e tecnologias para a gestão da exploração dos recursos do mar profundo, onde se destacam as tecnologias robóticas como a manipulação ou sistemas de navegação, monitorização e perceção;
- **BlueSensors** - tecnologias fotónica para a monitorização e exploração dos oceanos, com enfoque no desenvolvimento de sensores inovadores para a monitorização marinha.

Considerando os projetos de investigação que foram apresentados, existe um motivo e abertura para o desenvolvimento deste tipo de tecnologia que visa combater a poluição marinha e, por outro lado, a necessidade de monitorizar, avaliar e classificar os ecossistemas marinhos, com grande foco na captação de imagens de plâncton e de peixes juvenis, caracterizando-as.

Este sistema terá que operar autonomamente, ser possível o modo *mooring* em plataformas fixas e móveis e a integração em robôs como um *additional sensor*.

### 1.3 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento e na avaliação de um sistema para deteção e medição de peixes juvenis em ecossistemas aquáticos.

Relativamente ao tema de plâncton, foi colocado como secundário o desenvolvimento do sistema para deteção de plâncton, apenas se manteve o estudo das tecnologias no mercado e comparativa que irá ajudar nas especificações do sistema, como a de formulação do problema em que consiste na descrição dos vários grupos de fitoplâncton e zooplâncton.

O sistema para os peixes juvenis deverá oferecer uma solução de deteção aprimorada, métodos de *deep learning* e de medição precisa.

Enumerando os objetivos para a realização de uma solução para produto final, o desenvolvimento deste projeto passa pelos seguintes objetivos:

- Estudo e análise das tecnologias presentes no mercado de plâncton e peixes juvenis;
- Realização de uma análise comparativa das especificações dos sistemas do estudo do mercado para suportar as escolhas no dimensionamento do sistema;

- Desenvolver uma proposta de sistema para *software*, *hardware* e mecânico com as especificações de componentes;
- Implementação do sistema proposto para detecção de peixes juvenis;
- Implementação de algoritmos necessários para o processo de retificação de imagens e testes;
- Validação do sistema em ambiente de laboratório, desde a sua calibração esteérico como a nível estrutural e mecânico;
- Realizar testes em cenário real com o sistema implementado;
- Realização de treino com rede neural com as imagens recolhidas no cenário real;
- Realização de um teste e discussão dos resultados com o *dataset* recolhido para detecção e medição automática de peixes juvenis.

## 1.4 Organização da Dissertação

Este documento está estruturado em um total de seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao trabalho que será desenvolvido. O segundo capítulo dedica-se à formulação do problema em estudo, referente ao plâncton e aos peixes juvenis, bem como uma fundamentação de estudo de mercado relacionada com o tema tratado nesta dissertação. O terceiro capítulo aborda um teor mais teórico, trazendo considerações relevantes do ponto de vista conceptual. No quarto capítulo, é descrito o sistema proposto para a aquisição de imagens de peixes juvenis. O quinto capítulo descreve o sistema completo, desde a parte mecânica, *software* e *hardware*, bem como os resultados experimentais obtidos. Por fim, o sexto capítulo refere-se à conclusão e ao trabalho futuro.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

### 2.1 Formulação do Problema

Os ecossistemas marinhos são sustentados por complexas redes tróficas, das quais os organismos planctônicos, como o fitoplâncton e o zooplâncton, desempenham papéis fundamentais. O fitoplâncton, composto por microrganismos fotossintetizantes forma a base da cadeia alimentar aquática, sendo responsável pela produção primária que suporta diversas espécies. Por outro lado, o zooplâncton, que inclui uma variedade de organismos heterotróficos, atua como consumidor primário, alimentando-se do fitoplâncton e servindo de alimento para níveis tróficos superiores.

Contudo, nas últimas décadas, um novo fator perturbador tem-se infiltrado nesses ecossistemas: os microplásticos. Esses pequenos fragmentos de plástico, com menos de 5 mm de diâmetro, estão cada vez mais presentes nos ambientes marinhos, impactando diretamente a biodiversidade e a saúde dos organismos planctônicos. A ingestão de microplásticos por fitoplâncton e zooplâncton pode comprometer a sua função biológica, afetando, assim, a estrutura e o funcionamento de toda a teia alimentar marinha.

Este capítulo explora as características e interações do fitoplâncton e do zooplâncton, e de peixes juvenis, discutindo também como a poluição por microplásticos pode alterar a dinâmica desses organismos essenciais para o equilíbrio ecológico dos oceanos. Além disso, examina-se o impacto dessas alterações na biodiversidade marinha e nos serviços ecossistêmicos proporcionados pelos oceanos.

### 2.1.1 Fitoplâncton

O termo fitoplâncton (do grego *phyton* que significa planta e *planktos* que significa errante) foi criado em 1897 e refere-se a organismos majoritariamente autotróficos oxigénicos que são incapazes de vencer as correntes. É composto principalmente por organismos unicelulares e são os principais seres fotossintetizantes do ambiente marinho. O fitoplâncton é, conseqüentemente, uma comunidade de organismos bastante diversa que não compartilha um ancestral recente em comum. Estão distribuídos em dois domínios, Bacteria e *Eukarya*. Dentro de *Eukarya* há pelo menos quatro divisões com representantes autotróficos no fitoplâncton marinho.[5]

Os organismos fitoplanctônicos podem variar de amplitude de tamanho, sendo que alguns podem ser capturados por redes de malha fina, mas a grande maioria podem ser por centrifugação ou filtração de um grande volume de água do mar.

Existe outras espécies de algas macroscópicas que derivam ao sabor das correntes, como o gênero *Sargassum* no mar de Sargaço. Entretanto, é apenas restrito a pequenas áreas. As algas *bentônicas* macroscópicas também têm uma distribuição limitada à zona costeira, onde a luz solar consegue chegar ao fundo. Comparado com o fitoplâncton que está distribuído em todas as áreas iluminadas dos oceanos.

Sendo que o fitoplâncton é o principal organismo autotrófico marinho na comunidade, tem um papel importante na cadeia trófica. Mesmo que a sua biomassa fotossintética representa menos de um por cento, é responsável por 48% da produção primária anual da Terra. Nos oceanos, mais de 90% .[5]

#### Ambiente Marinho

A idade dos oceanos é estimada em 4600 milhões de anos. A vida no planeta Terra surgiu há cerca de 4400 milhões de anos atrás, muitas formas de vida primitiva evoluiu no ambiente terrestre e na água doce.

Os oceanos cobrem aproximadamente 70% da superfície do nosso planeta, sendo que o volume total do ambiente marinho garante cerca de 300 vezes mais espaço para o desenvolvimento da vida que o ambiente terrestre. A imensa maioria dos organismos fotossintetizantes marinhos é representada por seres microscópicos unicelulares que flutuam na água.

Outra característica que é vantajoso, a água que é um constituinte fundamental nos organismos vivos, sendo que comparando com o que há disponível na terra é um fator limitante para a vida, visto que existe alguns locais que está pouco disponível. Um fator extra além das características mencionadas, a temperatura dos oceanos é muito mais estável que a temperatura do ar.

O ambiente marinho também tem os seus desafios em relação ao ambiente terrestre. A intensidade e disponibilidade da luz, que apenas 50% da energia luminosa total de facto penetra na água do mar e se extingue com o aumento da profundidade. Os organismos fotossintetizantes podem crescer numa faixa superficial que se estende de poucos metros em águas turvas por algumas centenas de metros em

águas claras. A faixa iluminada dentro de um corpo de água chama-se zona eufótica. Abaixo da zona eufótica há uma zona fracamente iluminada, denominada por zona disfótica. Nessa região os peixes e alguns invertebrados podem ver, mas a luz é muito fraca, ao ponto da respiração exceder a produção primária realizada pela fotossíntese. A maior parte do oceano aberto está em total escuridão, ambiente denominado zona afótica.

No mar, a matéria orgânica se deposita em regiões muito abaixo da zona eufótica onde ocorre a produção primária, esses nutrientes só conseguem subir para a faixa iluminada por movimentos físicos das massas da água. Na zona eufótica não é apenas a luz que diminui com a profundidade, mas também a temperatura da água do mar diminui drasticamente e o alimento se torna escasso. [5]

Os organismos marinhos tendem a ser restritos devido a essas mudanças descritas acima, assim como o fitoplâncton é restrito à zona eufótica. Os oceanos podem ser divididos em ambientes. Há a divisão entre o ambiente pelágico e bentônico, como representado na figura 2.1.

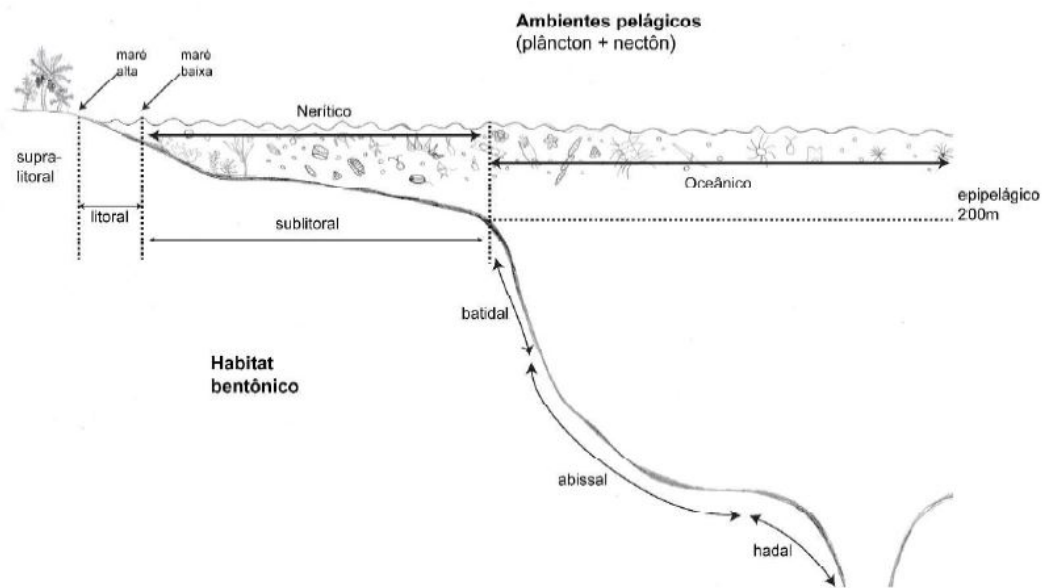


Figura 2.1: Divisão ecológica do oceano [5]

O ambiente pelágico compreende a coluna de água desde a superfície até o fundo. O ambiente bentônico envolve o assoalho marinho. Outra divisão separa o oceano aberto em região oceânica da zona costeira nerítica, sendo a marca dessa separação a quebra da plataforma continental (cerca de 200 metros de profundidade). A zona costeira compreende apenas 8% da área total dos oceanos.

Podemos classificar as espécies como oceânicas (que vivem longe da costa) e espécies neríticas (vivem sobre a plataforma continental). As espécies bentônicas são as que vivem no fundo do mar e espécies pelágicas são aquelas que nadam ou flutuam na coluna de água.

O ambiente pelágico é subdividido em duas categorias de organismos. Os organismos planctônicos, que não conseguem vencer as forças das correntes de água e são passivamente transportados. O nécton que são organismos capazes de nadar e vencer a força das correntes. [5]

### Principais grupos de Fitoplâncton marinho

#### Diatomáceas

Atualmente, com 9709 espécies descritas, as diatomáceas pertencendo à classe *Bacillariophyceae* têm a maior diversidade de espécies conhecida do fitoplâncton. São organismos dominantes em áreas temperadas em altas latitudes.

As diatomáceas são abundantes no ambiente marinho desde o Cretáceo, cerca de 100 milhões de anos atrás. Representadas na figura 2.2, são importantes produtores primários em regiões costeiras e zonas de ressurgência, estimando-se que mais de 40% da produção primária dos oceanos seja realizada por estes seres.

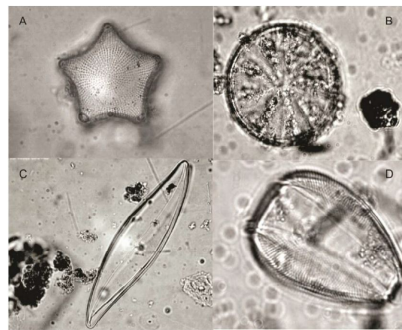


Figura 2.2: Diferentes formas de diatomáceas marinhas: a) *Triceratium pentacrinus* - vista ventral ou valvar (cêntrica); b) *Actinocyclus vulgaris*- vista valvar (cêntrica); c) *Pleurosigma* sp. - vista valvar (penada); d) *Coscinodiscus granii* - vista lateral ou pleural (cêntrica) [5]

As diatomáceas planctônicas não têm nenhuma organela ou aparato locomotor, ou seja, não conseguem realizar movimentos ativos independentes, como os outros organismos fotosintetizantes que dependem da luz para sobrevivência. As diatomáceas lutam contra o afundamento. Para isso, utilizam mecanismos de sobrevivência como o aumento da taxa de área da célula/volume (formas achatadas, formação de colônias), regulação iônica (concentração de íons é reduzida em relação ao do mar).

#### Dinoflagelados (*Dinophyceae*)

Os dinoflagelados sendo o segundo grupo mais abundante de microalgas no fitoplâncton, contam com aproximadamente 3000 espécies registradas. São muito peculiares, pois têm formas inesperadas. Ao contrário das diatomáceas, estes seres têm dois flagelos e têm propriedades de locomoção. Devido a esta característica, os dinoflagelados podem realizar verticalmente migrações na coluna de água. Durante o dia eles se encarregam de fazer fotossíntese na parte ensolarada na superfície, que é pobre em nutrientes, e durante a noite vão para o fundo tirar partido da maior

concentração de nutrientes. Por esse motivo, os dinoflagelados são mais numerosos no fitoplâncton de águas tropicais e subtropicais pobres em nutrientes.

Típicamente a morfologia de um dinoflagelado consiste em um epicone e um hipocone. Um sulco longitudinal percorre perpendicularmente o sulco transversal na região ventral da célula.



Figura 2.3: Morfologia da célula de dinoflagelado típica, *Protoperidinium* [5]

Existem outros gêneros de dinoflagelados denominados por atecados, como *Ceratium*, *Protoperidinium*, *Gonyaulax* e *Dinophysis*. Estes não possuem uma armadura celulósica, apenas têm uma película. Algumas espécies estão ilustradas na figura 2.4.

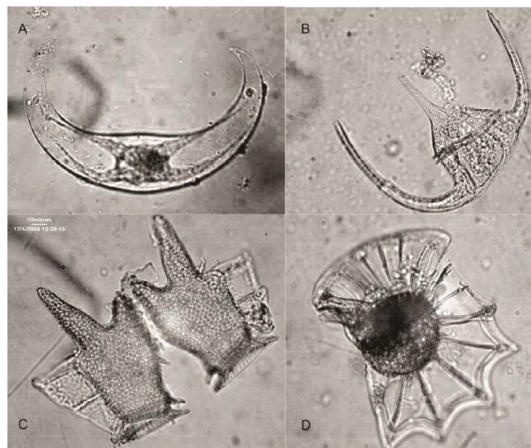


Figura 2.4: Diferentes formas de dinoflagelados. a) *Pyrocystis* sp. (célula atecada); b) *Ceratium tripos* (célula tecada); c) *Dinophysis tripos* (célula tecada); d) *Ornithocercus steinii* (célula tecada) [5]

### Outros grupos do fitoplâncton

Os cocolitoforídeos são organismos unicelulares que formam parte do nanoplâncton, com tamanhos de (2 - 20µm). Pertencem à divisão *Haptophyta*, classe dos *Coccolithophyceae* e contam com 554 espécies registradas. Sua característica é a formação de várias placas calcárias como forma de carapaça, utilizado como forma de classificação deste ser. A maioria das espécies ocorre em mares quentes e vive em baixas

intensidades luminosas, embora possa ser encontrada em habitat nerítico e oceânico, assim como próximos à superfície. [5]

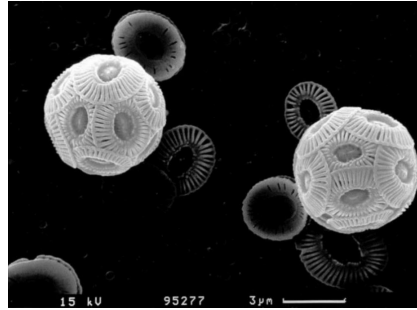


Figura 2.5: A alga *Emiliana huxleyi* só tem uma célula e é constituída por delicadas placas de carbonato de cálcio designado por cocolitoforídeos [6]

Algumas espécies atingem a abundância máxima a cerca de 100 metros de profundidade em águas oceânicas claras tropicais. *Emiliana huxleyi*, como ilustrado na figura 2.5, é provavelmente o cocolitoforídeo mais distribuído ao longo dos oceanos, exceto em mares polares. Por vezes essa espécie forma florações imensas no mar, que já foram estimadas entre 1000 a 500 km na superfície do oceano Atlântico Norte.

Há outro grupo de algas pertencentes à classe dos *Coccolithophyceae*, que não têm cocólitos e são bastante distintos dos cocolitoforídeos, que são importantes no ambiente marinho. Os *Isochrysis* são um género de pequenas algas cultivadas em laboratório e *Phaeocystis*, composto de espécies que foram colónias gelatinosas e entopem redes de pesca. Ambas as espécies estão ilustradas na figura 2.6.

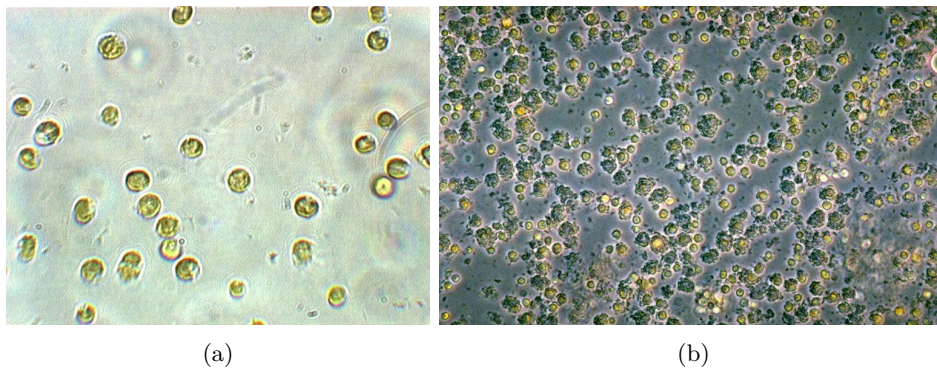


Figura 2.6: Amostra de: a) *Isochrysis*; b) *Phaeocystis* [7]

As *Dictyochophyceae* são uma outra classe de algas microscópicas do fitoplâncton marinho, com cerca de 107 espécies registadas até ao momento. Na linguagem comum são chamados silicoflagelados, pois têm um esqueleto interno formado de espículas silicosas, como ilustrado na figura 2.8. Estes seres são mais propícios em águas frias. [5]

### Fotossíntese e produção primária

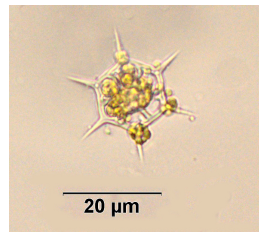


Figura 2.7: A *Dictyocha speculum* do Gulfo de Maine, EUA. Fase de formação do esqueleto, identificado pela sua forma hexagonal [8]

O fitoplâncton tem um papel muito semelhante ao das plantas no ambiente terrestre, sendo o principal produtor primário no ambiente marinho. A produção primária é desencadeada pela luz solar e transforma compostos inorgânicos em moléculas orgânicas pelo processo da fotossíntese. A fotossíntese aumenta com o aumento da intensidade de luz solar, sendo proporcional à quantidade de luz que chega ao sistema por fração de água. [5]

A produtividade primária é representada pela quantidade de carbono por unidade de tempo. Na qual o seu crescimento é expresso em de carbono produzido por de clorofila por hora. A produtividade marinha difere nas diferenças latitudinais e sazonais, pois resultam em diferentes disponibilidades de luz e nutrientes. Essas características determinam a possível produtividade máxima do fitoplâncton no ambiente marinho. Adicionalmente, o zooplâncton controla a densidade populacional do fitoplâncton.

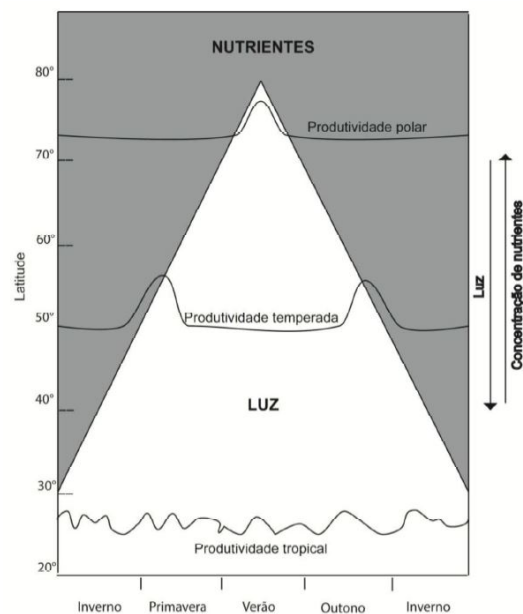


Figura 2.8: A produção primária no oceano de acordo com a sazonalidade em três latitudes distintas. A abundância relativa de luz (triângulo branco) e nutrientes (área cinza) na superfície do mar [5]

## Zooplâncton

O zooplâncton é um animal que vive toda ou parte da sua vida como plâncton (da palavra grega "à deriva") suspenso e à deriva em água doce ou salgada, raramente, ou nunca, entrando em contacto com superfícies duras. São geralmente animais muito pequenos ou grandes mas de corpo mole que conseguem nadar longas distâncias ou contra as correntes, como os peixes, as lulas ou os mamíferos marinhos. Existe uma vasta gama de animais, desde os protozoários primitivos até as larvas de animais mais complexos, e variam em tamanho desde organismos microscópicos até alguns dos animais mais compridos.

Os locais mais abundantes de onde a população de zooplâncton se encontra é na superfície do oceano, onde há mais luz solar que sustente o fitoplâncton, sendo o primeiro da cadeia alimentar e alimento de muitos zooplâncton.[9]

O zooplâncton é extremamente importante para os ecossistemas, uma vez que faz parte da cadeia alimentar, servindo de alimento para diferentes animais, fazendo parte da dieta de invertebrados, peixes e até grandes mamíferos. Quando impactadas, algumas populações de peixes, por exemplo, também são impactadas. Caso essas espécies tenham valor económico, pode ter grandes prejuízo, não esquecendo que além de ser alimentado, é utilizado para identificação da qualidade da água.

## Classificação

Na figura 2.9, é possível observar os vários tipos de tamanho e classe de plâncton em que se enquadra.

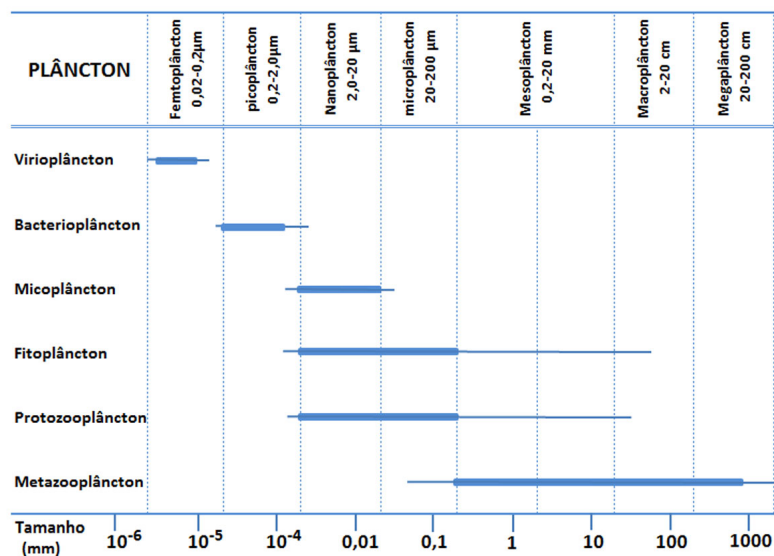


Figura 2.9: Divisão de plâncton em classes e dimensões [10]

## Principais grupos de Zooplâncton Copépodes (*Copepoda*)

O nome copéode tem sua origem em duas palavras gregas: *kope*, que significa

remo, e *podos*, que significa pés. Existem cerca de 12500 espécies de copépodes registradas, sendo que os grupos mais comuns são *Calanoida*, *Cyclopoidea* e *Harpacticoida*.

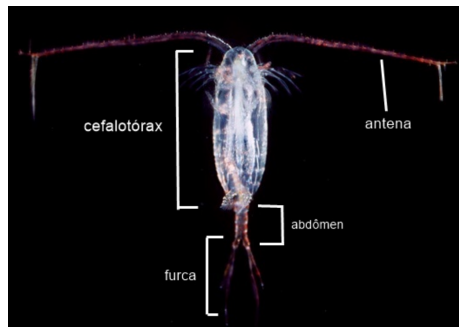


Figura 2.10: Um copépode calanoide, em que podem ser vistas as duas antenas e seu cefalotórax, que é grande em comparação com o abdômen. No final do abdômen pode ser vista a furca, com os ramos caudais [11]

Os calanoides são copépodes que apresentam antenas muito longas e são consumidores primários, que ingerem boa parte da matéria orgânica produzida pelo fitoplâncton. Os ciclopoideos apresentam antenas moderadamente longas. A principal característica que diferencia ambos os grupos é o tamanho relativo do abdômen, apresentando um abdômen mais curto os calanoides, figura 2.10, enquanto os ciclopoideos apresentam do mesmo tamanho que o seu cefalotórax, figura 2.11.



Figura 2.11: Copépode ciclopoide fêmea com suas duas antenas moderadamente grandes, cefalotórax praticamente do mesmo tamanho que o abdômen e dois sacos ovíferos [11]

### Cladóceros (*Cladocera*)

Os cladóceros, do grego *kládos*, que significa ramo e *kéras* sendo chifre, são pequenos crustáceos branquiópodes chamados pelo nome comum de "pulgas da água". São predominantemente dulcícolas, com poucas espécies marinhas. O tamanho destes seres, varia entre 0,2 a 3 milímetros. As características principais que apresentam são, uma carapaça quitinosa que cobre e protege a cabeça e o corpo. Nas regiões torácica e abdominal, a carapaça é fechada no dorso e aberta na região ventral,

dando a aparência de duas valvas. Nas figuras 2.12 e 2.13 são apresentados alguns exemplos.

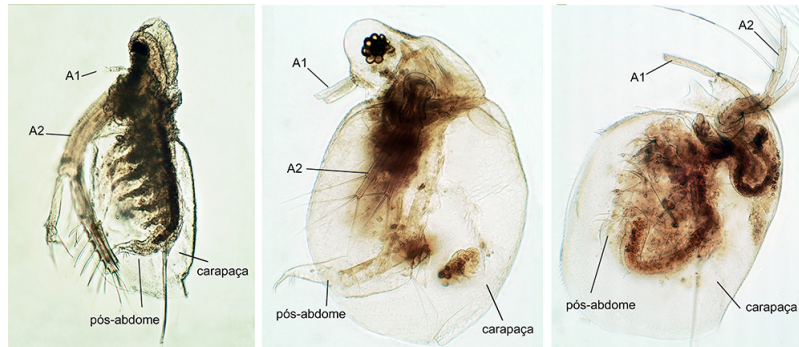


Figura 2.12: Exemplos de cladóceros, demonstrando as características deste ser [12].

Estes seres vivos são componentes importantes da comunidade zooplanctônica, e são muito utilizados em estudos ambientais na avaliação da qualidade das águas e no impacto ambiental de atividades potencialmente poluidoras.



Figura 2.13: Exemplos de cladóceros [12].

### **Rotíferos (*Rotifera*)**

Os rotíferos são animais aquáticos microscópicos, também conhecidos como "animais de roda". Estes seres receberam esse nome devido às suas coroas ciliadas localizadas em sua cabeça, sendo uma característica de locomoção como para recolher partículas de alimentos. Podem ser encontrados no mundo todo, composto por mais de 2000 espécies diferentes, vivendo principalmente em habitats de água doce. Também é possível encontrar rotíferos em musgos, solos, esgotos, ambientes marinhos e até mesmo no interior ou exterior de outros animais.



Figura 2.14: Exemplos de rotíferos [13].

Os rotíferos apesar de parecerem unicelulares, são compostos por mais de 1000 células. Podem ter até 2 mm, mas geralmente medem entre 0.1 a 0.5 mm de comprimento.

Figura 2.15: Rotífero *Stephanoceros fimbriatus* capturado usando microscopia com DIC a 100X [13]

### Crustáceos

Os crustáceos são um grupo de animais que pertencem ao filo *Arthropoda*, apresentando certas características como um exosqueleto, pernas articuladas e corpo segmentado. Este grupo apresenta mais de 60000 espécies, sendo que os mais conhecidos, os caranguejos, camarões, lagostins, lagostas. A grande maioria são encontrados no ambiente aquáticos, mas também há espécies terrestres. O tamanho destes seres podem variar, sendo que o menor crustáceo apresenta cerca de 100  $\mu\text{m}$ , e os maiores, como o caranguejo-aranha do Japão, apresentam até 4 m de abertura de pernas como ilustrado na figura 2.16.

Os crustáceos ocupam diferentes níveis tróficos, sendo importantes nas cadeias alimentares aquáticas. Existindo uma grande variedade de dietas e formas de alimentação, podendo ser predadores, filtradores e até parasitas. Principalmente uma



Figura 2.16: O caranguejo-aranha japonês pode apresentar até 4 metros de aberturas de pernas [14]

vez que tem importância econômica, são utilizados na alimentação humana, como o camarão e a lagosta. Pode ser encontrado na figura, 2.17 uma variedade de espécies onde se enquadra este grupo.



Figura 2.17: Variedade de espécies de crustáceos [14]

### **Cnidários (*Cnidaria*)**

Os cnidários são um grupo de animais muito simples, porém mais complexos do que as esponjas. Nesse grupo temos uma característica que é o surgimento de tecidos, os quais permitem o desenvolvimento de certas funções, como a capacidade de natação e responder a estímulos. Atualmente são conhecidos cerca de 10000 espécies de cnidários, sendo a maioria marinha.[15]

Os cnidários apresentam formas sésseis e móveis, que definem-se como pólipos e medusas. Como ilustrado nas figuras 2.18a e 2.18b.

As medusas é uma forma de vida que se move ativamente, apresentando um formato de sino e boca voltada para baixo, entre os seus tentáculos. Alguns exemplos destes seres são a caravela-portuguesa e medusa-da-lua.

Os pólipos, não apresentam uma movimentação ativa. Algumas espécies, no entanto, são capazes de se mover quando em perigo. Alguns exemplos destes seres são as hidras e anêmonas-do-mar.

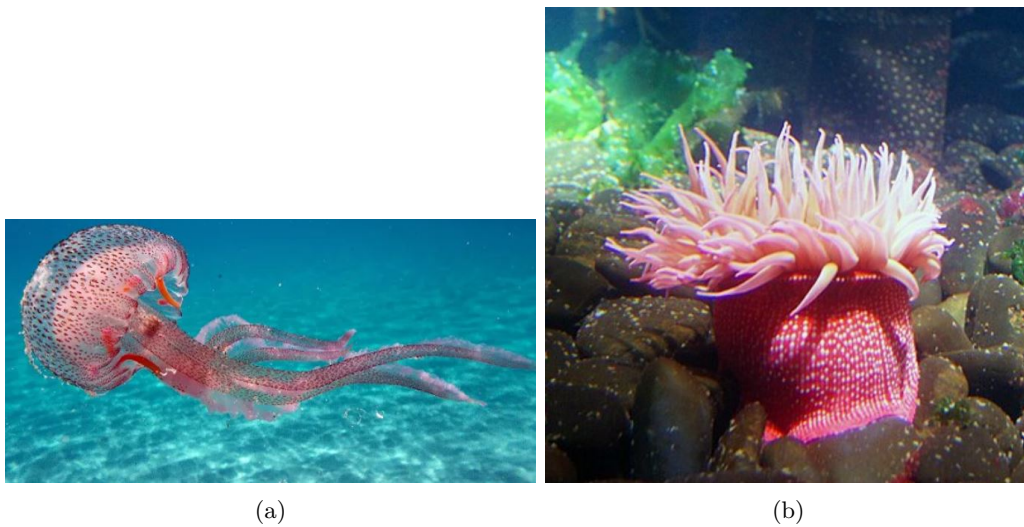


Figura 2.18: Exemplo de espécie: (a) medusa; (b) crustáceo [15]

### 2.1.2 Peixes Juvenis

Os peixes juvenis representam uma fase intermediária crucial no ciclo de vida dos peixes, entre o estágio larval e a fase adulta. Esse período é marcado por um crescimento acelerado, mudanças morfológicas e adaptação ao ambiente, preparando o organismo para a reprodução e a sobrevivência a longo prazo.

Os juvenis diferem tanto das larvas quanto dos adultos em diversos aspectos: (1) tamanho e forma; (2) Comportamento alimentar, ou seja, mudam de dieta conforme crescem, começando com zooplâncton e passando para presas maiores; (3) Estratégias de sobrevivência, adotam táticas como camuflagem, cardumes e preferências por habitats protegidos para evitar predadores.

Os juvenis são fundamentais para a manutenção do equilíbrio ecológico, pois: (1) Ligam diferentes níveis da cadeia alimentar, servindo como presas para espécies maiores e controlando populações de organismos menores; (2) Indicadores de qualidade ambiental, pois sua abundância e saúde refletem as condições dos ecossistemas aquáticos; (3) Sustentam pescarias comerciais, pois o sucesso da fase juvenil impacta diretamente a renovação das populações de peixes exploradas economicamente.

A sobrevivência dos juvenis depende de habitats específicos que oferecem abrigo e alimento. Como por exemplo, os estuários desempenham um papel essencial como habitats de crescimento para peixes juvenis, fornecendo alimento, proteção contra predadores e condições ambientais favoráveis. O estudo "Juvenile fish condition in estuarine nurseries along the Portuguese coast" (Vasconcelos et al., 2009) avaliou a condição de juvenis de cinco espécies economicamente e ecologicamente importantes: *Solea solea*, *Solea senegalensis*, *Platichthys flesus*, *Diplodus vulgaris* e *Dicentrarchus labrax*. Neste estudo, os peixes foram recolhidos em nove estuários ao longo da costa portuguesa (Minho, Douro, Ria de Aveiro, Mondego, Tejo, Sado, Mira, Ria Formosa

e Guadiana) durante a primavera e o verão de 2005 e 2006, anos com condições climáticas distintas.

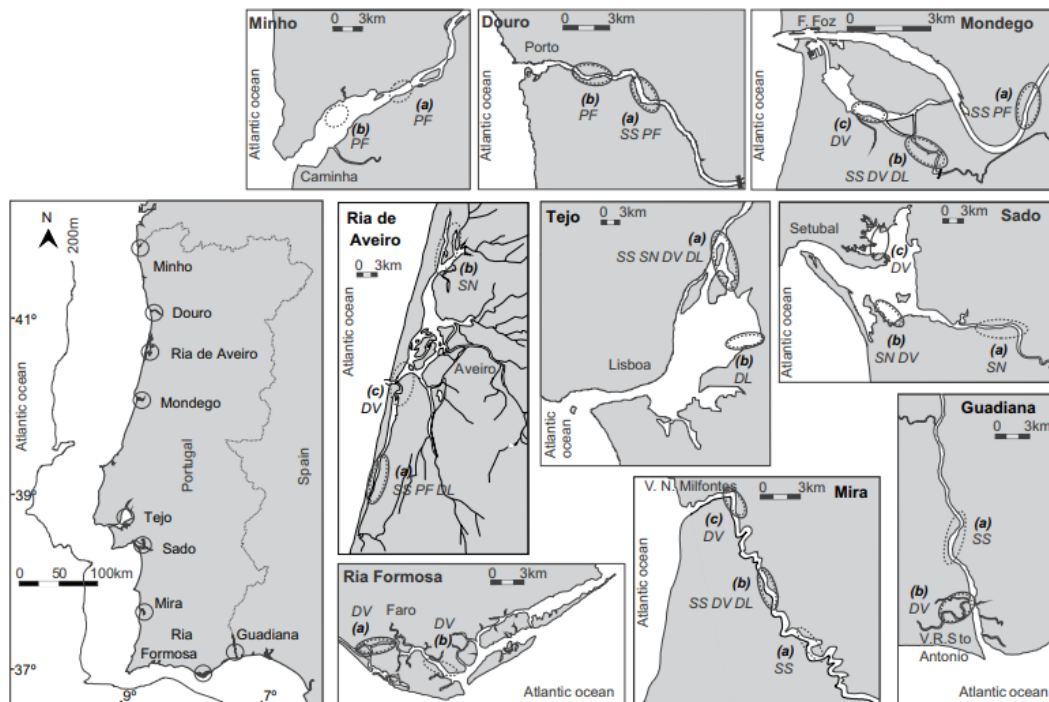


Figura 2.19: Localização das amostras recolhidas para o estudo [16]

O estudo teve como objetivo principal avaliar a qualidade dos estuários como áreas de crescimento para os juvenis, utilizando dois indicadores de condição: (1) Índice bioquímico (RNA:DNA) – Indicador da taxa de crescimento e condição nutricional dos juvenis; (2) Índice morfométrico (Fulton's K) – Baseado na relação peso-comprimento para avaliar a robustez dos peixes.

### 2.1.3 Métodos e Objetivos

Nesta secção, irá ser abordado os métodos e objetivos tendo em vista as estratégias e aplicações que os biólogos utilizam na captura, estudo e informações importantes a reter nesta área de estudo do plâncton. Com um teor de métodos utilizados nos sistemas existentes. Finalizando com o objetivo que se pretende nesta dissertação, dado a formulação do problema.

#### Métodos Tradicionais versus Atuais

Nas últimas décadas, têm vindo a ser apresentadas novas soluções cujos resultados conseguem ser obtidos e processados com maior rapidez e no local da recolha.

Pelo método tradicional, é realizado a recolha de um conjunto de amostras numa certa região pretendida para o estudo do fitoplâncton, que é transportada para o laboratório em que é submetido por um processo com a utilização de um microscópio. Na figura 2.20 é apresentado um conjunto de etapas desde a recolha da

amostra até aos resultados, mostrando processos de preservação, concentração e interpretação.[16] Este método convencional é suficientemente eficaz para a caracterização da estrutura taxonómica e a biomassa das comunidades fitoplanctónicas. Ainda mais abrangente, serve de estudo para múltiplas áreas como:

- **Indicador de qualidade de água:** O fitoplâncton responde rapidamente a alterações nos nutrientes e condições ambientais, como temperatura, luz e níveis de poluição. Alterações na composição e abundância das espécies podem indicar eutrofização, poluição orgânica ou mudanças climáticas;
- **Monitorização de fluorescência algas nocivas:** Certas espécies de fitoplâncton, como dinoflagelados e diatomáceas, podem formar *blooms* tóxicos. Esses eventos têm impactos económicos e ecológicos, incluindo a contaminação de frutos do mar, mortalidade de peixes e redução do oxigénio dissolvido;
- **Compreensão das cadeias alimentares e produtividade primária:** O fitoplâncton é a base da cadeia alimentar aquática. Estudos sobre sua abundância e diversidade ajudam a entender dinâmicas tróficas no ecossistema. A análise da biomassa de fitoplâncton ajuda a calcular a produtividade primária, sendo crucial para a modelização e estudos sobre o ciclo do carbono.

**Atualmente**, tem sido investido fundos para desenvolvimento de soluções de sistemas inteligentes que é possível integrar num AUV's ( *Autonomous Underwater Vehicles*) ou por exemplo a utilização de uma abordagem chamada *mooring* em que se fixa a uma estrutura permanente que se pode incluir boias, cais ou sistemas de amarração no fundo do mar.

Numa versão de um sistema tipo *glider*, é um veículo autónomo não tripulado que é projetado para tipos de operação independente em ambientes aquáticos, com baixa necessidade de consumo energético e eficiente. Considerando a possibilidade de implementar um sistema de imagem e processamento no veículo autónomo, conseguimos ter um veículo independente e com um sistema de deteção e classificação no local de operação. Na figura 2.21, temos um veículo *glider* com um sistema *Zoocam* acoplado.

Podemos ainda, ter uma versão mais controlada a nível de exploração aquática, em que é um veículo autónomo do tipo AUV, sendo possível manobrar o veículo para todas as direções. Este tipo de veículos são ideais para explorações mais controladas em que não é necessário estar em constante movimentação comparado com o *glider*.

Por fim e o mais utilizado em embarcações, é o método do tipo *mooring*. Em que o sistema constituído pelo sistema de imagem, podendo ter sistema de processamento incluído, é ancorado por uma corda à embarcação, figura 2.22. Existe outros métodos em que é preso ao fundo do mar e fica temporariamente no local.

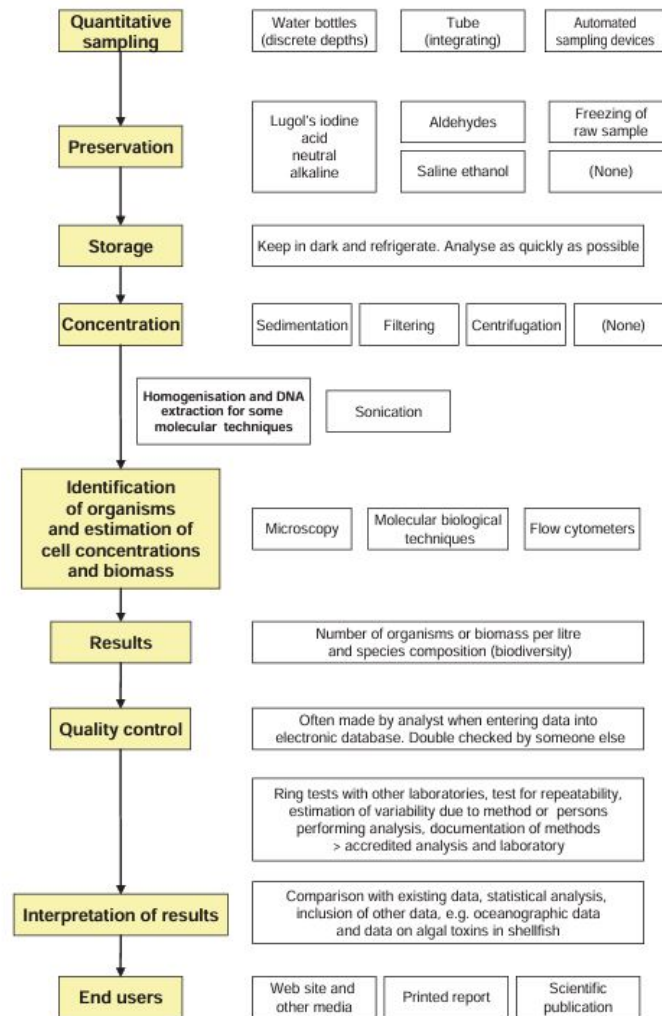


Figura 2.20: Desenho esquemático das etapas desde a amostragem até aos resultados [16]

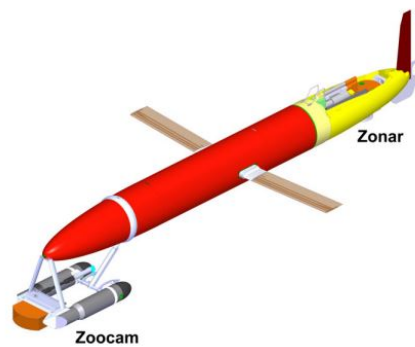


Figura 2.21: Representação do sistema *Zooglider* [17]

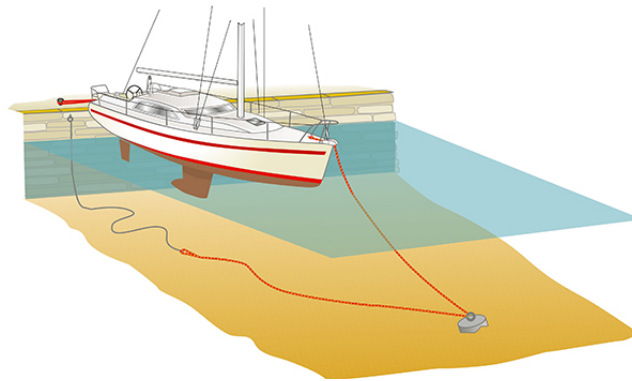


Figura 2.22: Tipo de *mooring Zooglider* [17]

Em suma, ambos os métodos são ativamente utilizados, contudo os novos sistemas têm vindo a ser vantajosos e práticos, e com bastante possibilidade a inovação no ramo da imagiologia de deteção e novos métodos de classificação de fitoplâncton e zooplâncton. Com isto, esta dissertação serve para dar resposta a essa necessidade de inovação e progresso na área, tanto a nível de imagem para deteção e classificação de espécies como no produto para ser viável na utilização por biólogos.

## 2.2 Estado de Arte

### 2.2.1 Introdução

Nesta secção é abordado uma análise dos vários tipos de tecnologias existentes no mercado referente ao tema desta dissertação, com uma compreensão dos aspetos teóricos, desenvolvimentos e soluções dos diferentes trabalhos.

Esta secção encontra-se dividida em quatro subsecções: Sistemas de Aquisição de Imagens de Plâncton, Sistema com Redes de Captação e Aquisição, Sistemas de Aquisição e Identificação de Peixes e por último uma Análise Comparativa. Em 2.3.2, 2.3.3 e 2.3.4 são apresentados os métodos de captura e aquisição de imagem de plâncton e os sistemas mais relevantes de cada método, abordando uma descrição sucinta das principais características. No 2.2.5, é descrito um sumário dos conteúdos abordados ao longo do capítulo.

### 2.2.2 Sistemas de Aquisição de Plâncton

Neste tópico será apresentado algumas das tecnologias que têm funções como detetar plâncton como classifica-los. Serve também o propósito de apresentar como estes sistemas foram dimensionados e que técnicas foram utilizadas.

#### **VPRII**

O sistema *Video Plankton Recorder* (VPRII) foi desenvolvido para a recolha rápida de plâncton e *seston* (conjunto de partículas orgânicas) na gama de tamanhos

de 100  $\mu\text{m}$ -1cm. O sistema VPRII inclui: (1) uma câmara digital de alta resolução Pulnix Inc model 1040, que captura imagens de 1008x1018 pixel monocromáticas a 30 fps, tem uma lente ajustável de 12.5 a 75 mm, com um flash de 20W a 30Hz sincronizada com o *shutter* da câmara; (2) um rápido *towfish* capaz de atingir velocidades de reboque de até 12 nós, movimento de 3 eixos para ondulação automática e evitar a agitação dos navios. Também está incorporado um cabo de reboque de pequeno diâmetro e um guincho para ser instalado em navios costeiros; (3) novo software de interface (Visual Plankton) para identificação automática do plâncton na visualização dos dados hidrográficos em tempo real. As ópticas da câmara e do estroboscópio são ajustadas em laboratório para selecionar o campo de visão (5-20 mm) e a profundidade de campo é calibrada objetivamente utilizando um organismo amarrado (por exemplo, copépode) e um software de deteção automática da focagem.[18]

Em comparação com as típicas técnicas com utilização de rede em zonas de plataforma, o VPRII conta mais plâncton por estação, quantifica formas frágeis omnipresentes, identifica automaticamente o plâncton e mede o seu tamanho, quantifica as escalas de irregularidade até alguns cm e apresenta distribuições de alta resolução.



Figura 2.23: O sistema VPRII  
[18]

O processamento de imagem consiste na deteção de objetos focados, extração e classificação das *features* dos objetos. Os passos seguintes são descritos com mais pormenor.

Para a deteção de objetos focados, as ROI's na imagem são detetadas utilizando um método de deteção de margens. O video é corrigido para iluminação irregular utilizando uma média de 500 fotogramas, seguida de uma binarização das imagens utilizando um limiar de brilho definido pelo utilizador. As regiões brancas da imagem (*blobs*) são detetadas e, se o seu tamanho for superior a um *threshold*, são utilizados como máscara na imagem original, para determinar o gradiente em escala de cinza nessa ROI, como uma medida e nível de foco do objeto. Se estiver acima de um limiar

definido pelo utilizador, a ROI da imagem original é guardada para processamento posterior. A partir da ROI obtida, é aplicada uma extração de características para utilização posterior na classificação.

As *features* recolhidas são na forma de invariantes de momento, granulometria, arredondamento, *Fourier* e baseadas na textura, como as matrizes de coocorrência.

As características são depois combinadas num único vetor de *features* com um total de 237 elementos.

Por fim, para a classificação, é treinado um classificador de rede neural através de uma classificação manual de um conjunto de ROI em diferentes grupos taxonómicos, extraíndo e transformando o seu vetor de *features*, e utilizando o método *Learning Vector Quantization* (LVQ) para ajustar os neurónios a estes vetores de características transformados.

A utilização deste método de classificação teve como resultados numa precisão de 7 a 10 classes de 60 % a 90 %. Na Figura 2.24 é visível um fluxograma do método de processamento de imagens.[18]

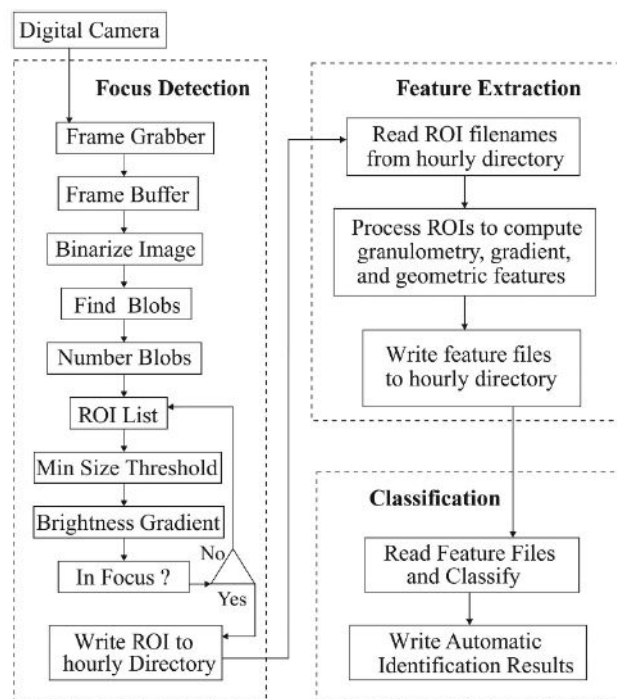


Figura 2.24: *Flowchart* do processamento de imagens do VPRII [18]

## ZOOVIS

O *Zooplankton Visualization and Imaging System* (ZOOVIS), é um sistema de deteção de zooplâncton, que é composto por duas cápsulas separadas por uma distância fixa, onde contém o sensor de imagem, ótica e a fonte de luz, como se pode observar na figura 2.25.

Na cápsula de iluminação, um sistema ótico especializado permite um feixe vermelho (625 nm) altamente colimado, produzido por um LED que tem um intervalo de pulso de 5 ms. Este feixe desloca-se através da coluna de água que separa as duas cápsulas e, na cápsula da câmara, é focado para a câmara por um conjunto de lentes. A câmara consiste numa câmara digital de alta resolução com um sensor CCD (*Charge Coupled Device*) de 12 bits e 5,0 MP capaz de capturar imagens a 15 HZ. Esta configuração de sistema permite um campo de visão de 30 cm, onde objetos entre 20 e 40  $\mu\text{m}$ , e maiores conseguem ser detetados.

Este sistema não realiza processamento de imagens em tempo real ou classificação, mas sim captura imagens. Apesar de tudo, foi publicado um estudo que desenvolveu um método de deteção e classificação de plâncton com o sistema ZOOVIS. [19]



Figura 2.25: Sistema ZOOVIS [18]

No estudo referido [19], foi desenvolvido uma abordagem semi-automatizada para analisar a taxa de plâncton em imagens adquiridas com o sistema ZOOVIS. Foi proposto um procedimento robusto para separar objetos do fundo não uniforme em imagens complexas em águas turvas. Uma das razões do destaque deste procedimento é que os métodos existentes foram concebidos para sistemas que obtêm imagens em ambientes controlados com amostras de laboratório ou *in situ*.

O processo incluí quatro passos: segmentação de ROI's, *denoising* de ROI's, descritores de *features* e classificação de taxonómica utilizando SVM (*Support Vector Machine*).

A segmentação da ROI foi diferente dos sistemas genéricos. O valores de *threshold* globais para a binarização, tem dois problemas principais na identificação de plâncton: segmentação de zooplâncton gelatinoso de grandes dimensões em objetos separados, sendo complexo o *merge* destas partes; Falta de organismos mais pequenos.

Devido a estes problemas, os autores implementaram uma estratégia para diferentes tamanhos de objetos. Para objetos com tamanhos compreendidos por ( $> 5000$  pixels, cerca de  $0.5 \text{ mm}^2$ ), aplicaram o método MSER (*Maximally Stable Extremal Regions*). Similar ao conceito de limiarização, apenas difere ao selecionar as

regiões de interesse. Para os organismos mais pequenos foi desenvolvido um limiar adaptativo. Com estes dois métodos, os autores combinaram as duas imagens binárias resultantes de cada método para uma obter uma imagem binária final. Na figura 2.26 podem ver-se os resultados de ambos os métodos. Para uma melhor compreensão do método utilizado, está disponível do artigo referenciado.[19]

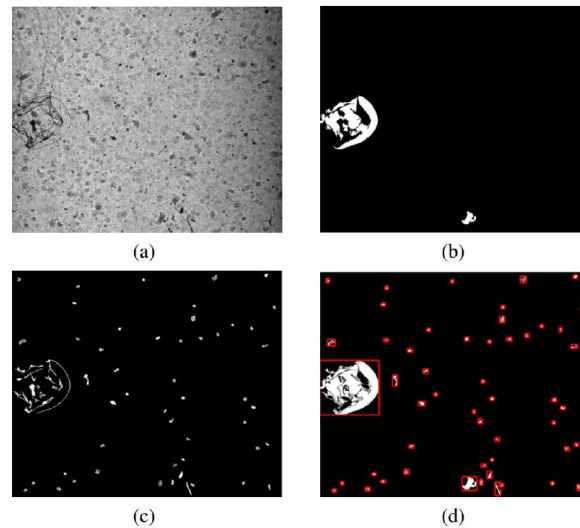


Figura 2.26: Resultados do método de segmentação da ROI, (a) imagem em bruto do ZOOVIS, (b) imagem binária da abordagem MSER, (c) imagem binária da limiarização adaptativa, (d) imagem binária combinada com os objetos segmentados realçados [19]

Após a obtenção das ROI's, o passo seguinte é a sua redução, uma vez que muitas vezes uma ROI individual pode conter vários objetos. De seguida, os valores de *greyscale* do maior componente ligado são extraídos da ROI original e os resto dos componentes ligados foram atribuídos com o valor médio. A utilização dos valores de *greyscale* em detrimento dos valores binários foi para manter a estrutura interna, com especial atenção para o zooplâncton, dada a sua transparência. Com os valores de *greyscale* extraídos, as textura das *features* para cada ROI são construídas.

Para classificar as ROI's em diferentes classes, primeiro são normalizadas. De seguida, é aplicado o método HOG (*Histogram of Oriented Gradients*) para descrever a forma de cada ROI.

Na figura 2.27, é demonstrado o método de construção dos descritores de *features* para um exemplo de ROI.

A classificação da ROI é efetuada em duas etapas, utilizando técnicas SVM. Na primeira etapa, os classificados de SVM foram treinados utilizando uma biblioteca criada manualmente de três classes: zooplâncton gelatinoso, com formato em seta e tipo copépoide. Na segunda etapa, cada ROI foi submetido a um classificador SVM específico de grupo, treinado para separar os objetos alvo dos não alvo.

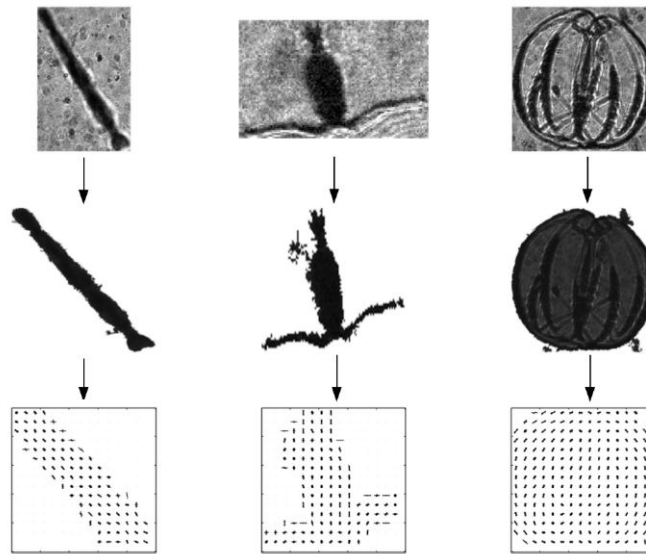


Figura 2.27: Métodos de construção das ROI's [19]

Para um melhor entendimento destes métodos, no estudo[19] demonstrado encontra-se um *flowchart* que exemplifica cada passo-passo realizado desde a imagem capturada pelo sistema ZOOVIS até a classificação do plâncton.

### GUARD1

O sistema GUARD1 é um instrumento autónomo de baixo custo para aquisição de imagens subaquáticas e reconhecimento de zooplâncton gelatinoso. Foi concebido para instalação e funcionamento autónomo em diferentes plataformas (por exemplo, fixas, rebocadas, móveis). O seu baixo custo, pequenas dimensões e baixo consumo energético, juntamente com um equipamento de bateria de longa duração, fazem dele um sistema ideal para instalações de longa duração. O sistema é totalmente programável e reconfigurável através de *software* para ser eficaz numa vasta gama de aplicações. Como se pode observar na figura 2.28.[20]

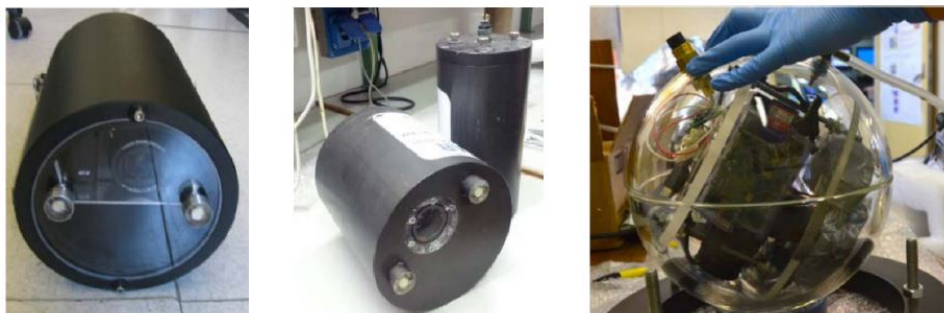


Figura 2.28: Três caixas diferentes para o sistema GUARD1. Esquerda: para utilização em profundidade até 40 m. Centro: para utilização em profundidades até 400 m. Direita: para utilização em profundidades até 10000 m [20]

O sistema de imagem que o GUARD1 utilizado é composto por uma câmara de consumidor programável CANON GX1 com 12.8 MP e dois *LED's* de 1 W para iluminação. Os parâmetros de aquisição da câmara, como o ISO, o tempo de exposição, a distância focal ou a abertura da íris podem ser ajustados automaticamente para se adaptarem às condições de luz, utilizando um *script* baseado no *Canon Hack Development Kit* (CHDK) [21], executado no *firmware* da câmara. O processo pode ser observado na figura 2.29.

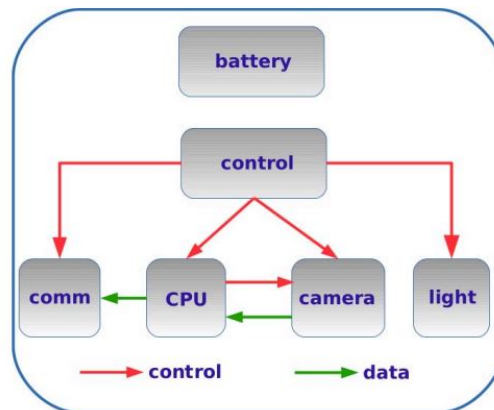


Figura 2.29: Esquema da arquitetura do sistema do GUARD1. As linhas vermelhas e verdes referem-se às atividades de controle e migração de dados entre os módulos do sistema, respetivamente [20]

As técnicas de aquisição, detecção e classificação de imagens são processadas no CPU (*Central Processing Unit*) de uma Raspberry PI. O comportamento do sistema durante as atividades de trabalho é o seguinte: o sistema permanece em *sleeping mode* num intervalo de tempo definido. Em seguida, o sistema de iluminação é ativado, bem como o módulo de aquisição de imagens se assim for necessário durante um intervalo de tempo definido. Por fim, o sistema volta ao modo de espera. Durante a fase de aquisição de imagens, a câmara começa por adquirir e armazenar um número predefinido de imagens. Após um certo número de sessões de aquisição, o sistema da placa CPU descarrega as imagens do disco de memória da câmara e executa os algoritmos de detecção e classificação.



Figura 2.30: Passos de processamento da imagem GUARD1. Da esquerda para a direita: imagem original, melhoramento da imagem imagem com CLAHE, segmentação de fundo/periferia, extração de contorno da imagem original com o operador Sobel e identificação da ROI [20]

O algoritmo de detecção e classificação de imagens consiste em cinco etapas: melhoria da imagem, segmentação fundo-fundo, identificação de ROI, extração de características e classificação da ROI.

Dada a transparência e características visuais do zooplâncton gelatinoso, é por vezes difícil a detecção por uma câmara normal, como se pode observar na primeira imagem da esquerda na figura 2.30. Por este motivo, o primeiro passo de processamento da imagem é no melhoramento da imagem, utilizando o algoritmo CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram*). O resultado é um combinado de uma imagem equalizada. Para a etapa de segmentação do primeiro plano de fundo, foi utilizado um filtro de *box-shaped* móvel em forma de caixa com o tamanho de captura para objetos de cerca 20 pixels. Este filtro transforma a imagem original numa binária, separando o fundo e o primeiro plano da imagem.

Por fim, para a obtenção da ROI da imagem, é processada para classificação extraíndo um conjunto de características para criar um vetor dos mesmos. As características extraídas podem ser divididas em dois grupos, baseadas em formas e em textura. Para mais detalhe relativo à forma como o algoritmo foi desenvolvido, encontra-se no artigo citado[20].

### **Scripps Plankton Camera**

O sistema SPC (*Scripps Plankton Camera* foi desenvolvido pelo Scripps Institute de Oceanografia para a observação *in situ* do plâncton em tempo real.

O sistema consiste em três nós distintos: o nó do sistema de imagem, um servidor para gerir dados e análise, e uma interface para clientes remotos observarem e anotarem imagens. Foram concebidas quatro configurações diferentes para os tamanhos do plâncton: *MACRO-SPC*, *MINI-SPC*, *MICRO-SPC* e o *DUAL-SPC*, este último consiste nos componentes de imagens dos sistemas *MINI-* e *MACRO-* na mesma caixa. O *MACRO-SPC* utilizou uma técnica de iluminação por matriz de lentes de projeção, enquanto os outros por iluminação de campo escuro. Na figura 2.31 é apresentado a arquitetura do sistema e o equipamento. Para informações mais detalhada das configurações e processos utilizados, segue-se o artigo publicado [22].

A detecção de ROI ocorre no sistema em tempo real e consiste em reduzir a amostragem da imagem em bruto através do cálculo da média dos pixels em blocos de 4 ou 16 pixels. Em seguida, é aplicado um *Canny edge detector* para detetar as bordas na imagem, seguido por um algoritmo de preenchimento de região usado para os contornos. São desenhadas *bouding boxes* a partir do centróide da mancha detectada. De seguida, as ROI são cortadas da imagem original e armazenadas antes de serem exportadas para um armazenamento remoto.

Para processar esta informação o sistema uma unidade de processamento de 1.8 GHz Quad Core Odroid XU3 com 2 GB de RAM, com um processo de 8 *frames* por segundo. Sendo que a classificação será feita remotamente devido a exigência

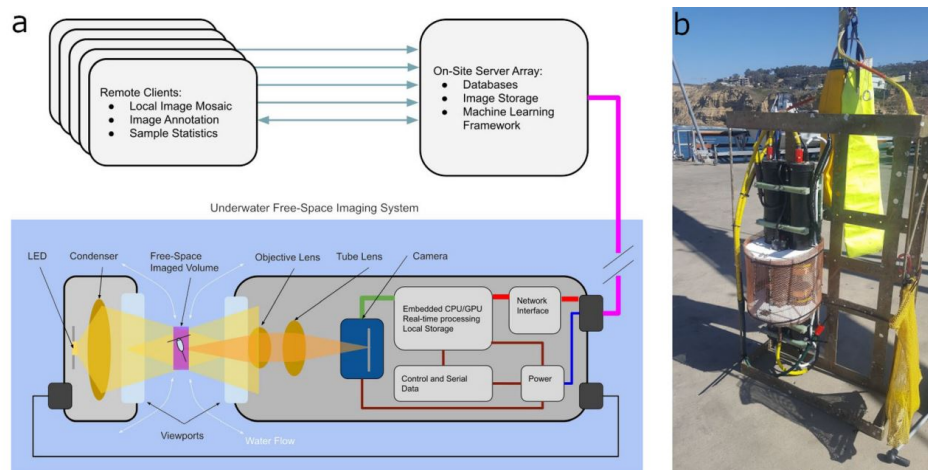


Figura 2.31: O sistema SPC: (a) Arquitetura de alto nível do sistema; (b) O sistema *MINI-* e *MICROSPC* antes duma missão [22]

computacional. Posteriormente, sistemas mais recentes já utiliza um GPU NVIDIA Jetson TX1 que permite classificação em tempo real.

Na figura 2.32 é apresentado um conjunto de especificações dos vários sistemas associados como as lentes, câmara, consumos, etc.

	MACRO-SPC	MINI-SPC	MICRO-SPC	DUAL-SPC
Objective lens	0.137× TC2MHR024-C (Opto Engineering)	0.508× TC2MHR096-C (Opto Engineering)	5.0× LMPLFN-BD (Olympus)	5.0× LMPLFN-BD (Olympus) 0.508× TC2MHR024-C (Opto Engineering)
Camera	MV BlueFox 3	Point Grey Grasshopper 3	Point Grey Grasshopper 3	MV BlueFox 3
Image sensor	Sony IMX253	Sony ICX814	Sony ICX834	Sony IMX253
Computer	NVIDIA Jetson TX-1	Odroid XU-4	Odroid XU-4	NVIDIA Jetson TX-1
Illumination	Projection lens array	Standard dark field	Standard dark field	Standard dark field
Power consumption	Idle: 13 W Avg: 15 W Peak: 20 W	Idle: 13 W Avg: 15 W Peak: 20 W	Idle: 13 W Avg: 15 W Peak: 20 W	Idle: 13 W Avg: 20 W Peak: 25 W
Length × width (cm)	137.2×24.1	38.1×15.2	38.1×15.2	94.5×21.6
Weight in air (kg)	30	22.7	22.7	11.3
Weight in seawater (kg)	1	9.1	9.1	<0

Figura 2.32: Especificações de *hardware* para várias versões do SPC (*Scripps Plankton Camera*)[22]

### 2.2.3 Sistemas de Aquisição de Plâncton com Redes de Captação

Os sistemas de rede para captação de plâncton são amplamente utilizados na pesquisa oceanográfica e limnológico para a recolha de organismos suspensos na coluna de água, como o fitoplâncton e o zooplâncton.

A estrutura básica de uma rede de plâncton consiste em componentes que permitem a captura seletiva dos organismos, de acordo com seu tamanho e características morfológicas. O funcionamento do sistema é simples: a rede é arrastada pela água em diferentes profundidades, filtrando os organismos que ficam presos nas suas malhas.

As redes de plâncton variam dependendo do tipo de plâncton que se deseja capturar. Por exemplo, redes com malhas de 10 a 20  $\mu\text{m}$  são utilizadas para fitoplâncton, enquanto redes com malhas entre 100 e 500  $\mu\text{m}$  são mais adequadas para zooplâncton. Também existem redes mais especializadas, como as redes bongo, que têm duas bocas de rede e são usadas para amostras comparativas.

O CPR[23], MOCNESS[24] e o MultiNet da Hydro-Bios[25] são alguns sistemas capazes de captar plâncton, utilizando um sistema de redes.

Este tipo de sistema têm as suas complicações, desde a instalação da rede à captura. As redes de plâncton têm malhas diferentes tamanhos que determina o tipo de organismo a capturar, no entanto, essa característica pode resultar em uma subamostragem ou super amostragem de determinadas populações de plâncton, o que leva a má interpretação dos dados recolhidos. Organismos mais delicados, como gelatinosos e outros mais frágeis podem ser danificados ou destruídos durante a recolha com redes, devido à força de arrasto, resultando em perda de amostras importantes. Contaminação cruzada, ou seja, durante a recolha em diferentes profundidades pode ocorrer a contaminação cruzada entre amostras, especialmente quando a rede não é devidamente limpa entre recolhas, que pode introduzir organismos indesejados para diferentes amostras.

Deste modo, o uso destes sistemas é limitado, normalmente utilizados em estudos de distribuição em escala reduzida. Surgindo novos sistemas com técnicas mais vantajosas para a recolha e deteção destes organismos.

### LOKI

O sistema denominado por LOKI (Lightframe On-sight Keyspecies Investigation), é um sistema avançado de recolha e análise de plâncton que utiliza imagem digital e inteligência artificial para identificar espécies de plâncton diretamente no local da recolha, como representado na figura 2.33. O LOKI foi desenvolvido para proporcionar uma abordagem não invasiva e precisa para o estudo da biodiversidade de plâncton em ambientes aquáticos.[26]

O sistema LOKI está dividido em 4 grandes partes: (1) A rede de concentração de plâncton, com uma abertura de boca de 0,28 m<sup>2</sup> e um tamanho de malha de 200  $\mu\text{m}$ , (2) O computador LOKI com os vários sensores de ambiente, (3) Sistema da câmara e (4) Bateria.

A configuração do sistema, está dimensionado de maneira a rebocar verticalmente na coluna de água. O Zooplâncton e outras partículas entram na rede de concentração pelo topo, antes de passarem por um canal que passa em frente da câmara (Figura 2.33(b)). Utiliza a Prosilica GC 1380H camera (AVT-Allied Vision Technologies, Canada) com uma lente Pentax 2514-M e uma resolução de imagem de 1360x1024 pixel a 30 fps, 2.33(c)). Utilização de iluminação *DarkField* e uma resolução de 23  $\mu\text{m}$  por pixel, com uma configuração sincronizada de um *high power*

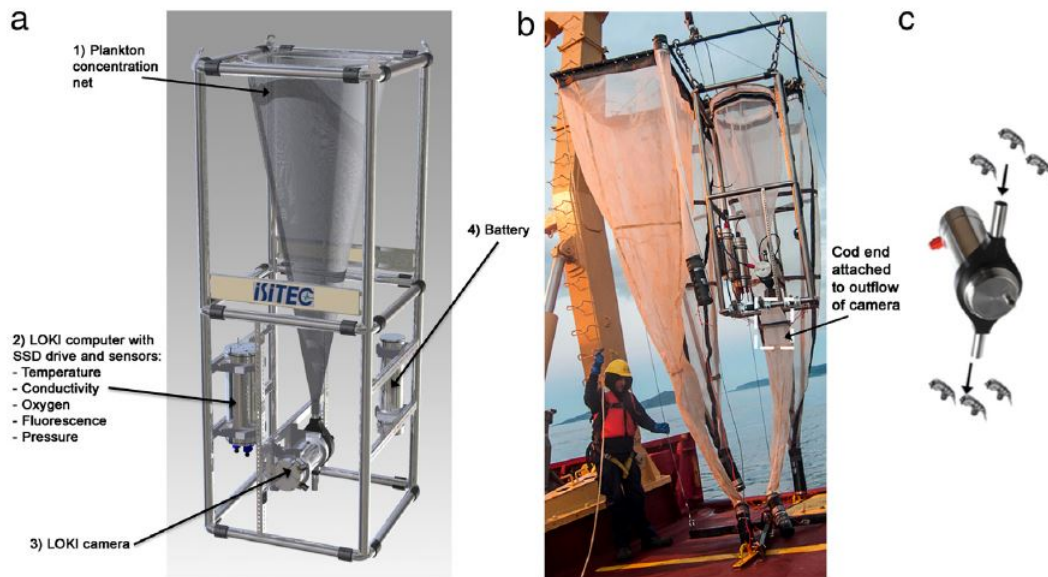


Figura 2.33: (a) Esquema do LOKI mostrando os seus principais componentes 1-4. (b) O sistema LOKI, à direita, ligado a uma estrutura para além de um amostrador tradicional de zooplâncton, durante uma operação recente no Ártico canadiano. (c) A câmara LOKI, mostrando como o plâncton passa através do canal para a captação de imagens

[26]

*Led flash unit* com um sinal *trigger* de exposição na câmara, que permite um rápido tempo de *shutter* ( $55 \mu\text{s}$ ), evitando imagens distorcidas ou com *blurring*. Por fim, em combinação com um *high imaging channel* de 4 mm, permite que todas as partículas capturadas na imagem sejam focadas.

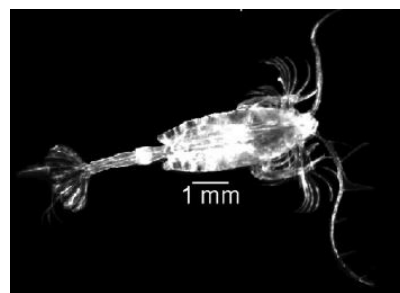


Figura 2.34: Imagem capturada de *Paraeuchaeta* com o LOKI

[26]

Um total de 15 *hauls* de 9 estações em todo o Ártico canadiano foram utilizados para obter imagens para este estudo. Os modelos de identificação automática, de comprimento e de largura foram treinados em imagens de 14 *hauls*, assegurando que todas as taxas de zooplâncton suscetíveis de serem encontrados na área de estudo, foram adicionados aos três modelos.[26]

De forma a assegurar a qualidade e a performance, foram desenvolvidos métodos de processamento de imagem: (1) ZOOMIE (*Zooplankton Multiple Image Exclusion*) que é processado em todas as imagens, escrito em PHP e JavaScript, que assegura a não duplicidade de imagens ou semelhantes; (2) LOKI browser extraí as características das imagens recolhidas e classifica os organismos com base num modelo de *machine learning* com o método de *random forest*.

#### 2.2.4 Sistemas de Aquisição e Identificação de Peixes

A identificação e medição de peixes em ambiente natural são desafios críticos para a monitorização da biodiversidade e da saúde do ecossistema marinho. A abordagem tradicional para essa tarefa envolve métodos manuais, como mergulho para recolher dados visuais ou captura direta. Para superar estas limitações, estudos recentes têm explorado o uso de sistemas automatizados de identificação e medição 3D, baseado em visão computacional.

##### **Automatic coral reef fish identification and 3D measurement in the wild**

Este presente estudo foi publicado pelas entidades *Research-team ICAR, LIRMM, Univ Montpellier* e *Univ. Nîmes* que introduziram um estudo sobre um sistema e um modelo para análise da população de peixe em 3D num ambiente natural.

Foi criado um sistema, como representado na figura 2.35, com a intenção de gravar vídeos em ambiente marinho utilizando um par de câmaras. Para isso, utilizaram duas GoPro Hero 4 com uma resolução de 1080 x 1920, ambas protegidas à prova de água, fixas num tubo rígido separadas por 80 cm, portanto esta será a *baseline* utilizada. Sendo que ambas as câmaras estão sincronizadas, e colocado um *LED* em cada uma, que ilumina a *camera view*. [27]

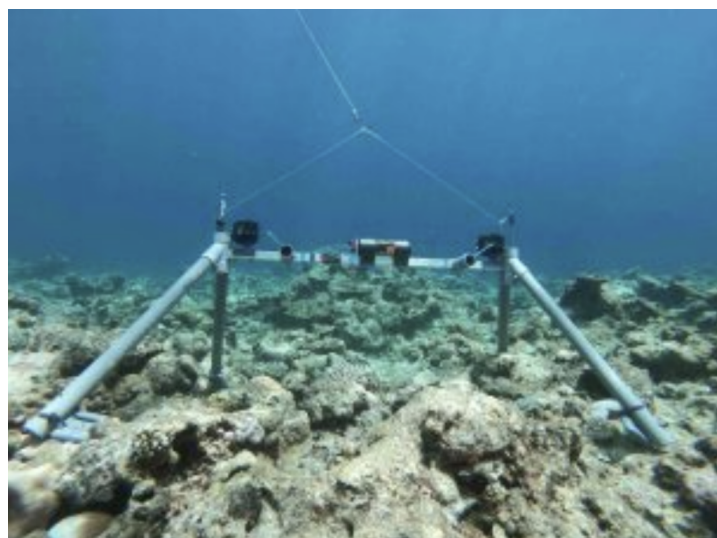


Figura 2.35: Câmara estereoscópica [26]

O método utilizado, está representado num *flowchart* na figura 2.37.

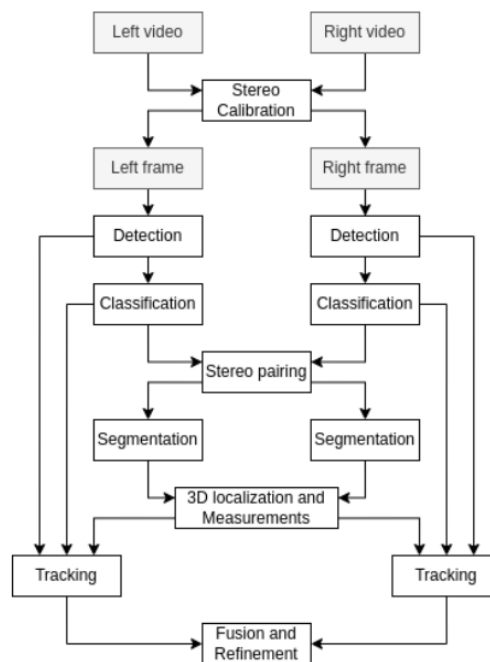


Figura 2.36: *Flowchart* do método automático de análise 3D [27]

Para a realização da calibração, um mergulhador com um quadro axadrezado foi gravado em várias posições e orientações dentro de 1-3 metros para a extração dos parâmetros das câmaras.

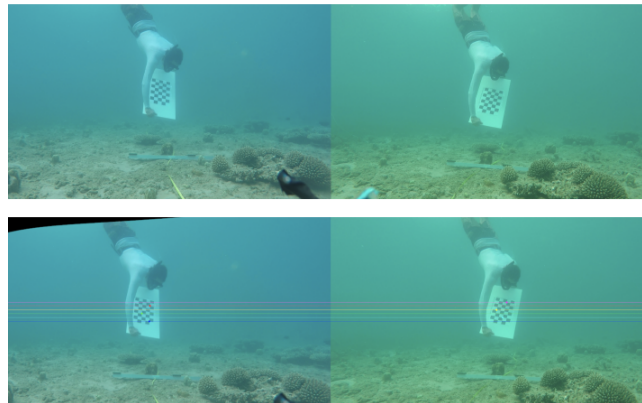


Figura 2.37: Imagem Retificada (*Top*) Imagem original estéreo com calibração. (*Bottom*) Mesmas imagens estéreo mas retificadas [26]

Ao longo do estudo e prática implementada, foi utilizado vários modelos para deteção, classificação e segmentação. Para a deteção foi utilizado YOLOv5x6 pré-treinado em ImageNet com uma resolução de 1280x1280 pixels. Para a classificação para a identificação de espécie, foi criado um *dataset* com 44625 anotações para 56 espécies diferentes. Foi selecionado o modelo EfficientNet-B6 model, como se pode observar na figura 2.38.

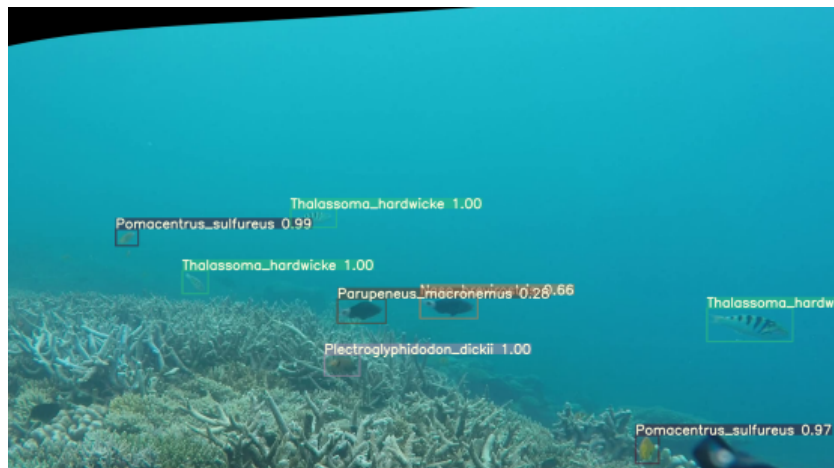


Figura 2.38: Imagem com a identificação de espécie com BB [27]

Para o trabalho de segmentação, foi escolhido o GoogleDeepLabv3+ com uma *database* de 25 *thumbnails* por espécie, num total de 1600.

Para medição e localização 3D, é determinada as posições-chave do peixe (focinho, cauda, parte superior e inferior), os pontos extremos das máscaras esquerda (ML) e direita (MR) são extraídos usando PCA para determinar o eixo principal de inércia. Em seguida, são estabelecidas correspondências usando a restrição epipolar dentro de uma tolerância de 3 pixels no eixo  $y$ . Por fim, calculam-se as coordenadas 3D dos pontos por triangulação, utilizando as matrizes de projeção das câmaras para PLR e PRL. Assim, estima-se o comprimento fulcral do peixe e sua altura para PLR e PRL, calculando as distâncias euclidianas. Além disso, computam o baricentro para os conjuntos PL e PR, resultando nos pontos BL e BR, respectivamente. Da mesma forma que fizeram para o comprimento e a altura, determinam a correspondência do baricentro da esquerda para a direita (BLR), criando o ponto correspondente como  $BR' = (BR_x, BL_y)$ . Finalmente, calculam-se as coordenadas 3D do centro para os conjuntos BLR e BRL e a média entre esses dois pontos.

### Underwater Fish Body Length Estimation Based on Binocular Image Processing

Nos últimos anos, diversas abordagens têm sido desenvolvidas para a medição do comprimento de peixes subaquáticos utilizando visão computacional. Entre essas abordagens, os sistemas baseados em visão binocular têm ganho destaque devido à sua capacidade de reconstrução tridimensional e cálculo preciso da profundidade dos objetos.

Cheng et al. (2020) [28] propuseram um método refinado de estimativa do comprimento corporal de peixes subaquáticos utilizando um par de câmaras e técnicas avançadas de segmentação de imagem. O estudo faz uso de uma Rede Totalmente Convolutiva (FCN) para segmentação do objeto de interesse na imagem e propõe um algoritmo para estimar a orientação corporal do peixe. Além disso, a técnica

de correspondência de blocos semi-global (SGBM) foi aplicada para calcular a profundidade do objeto a partir da paralaxe das imagens capturadas pelas câmaras. Os resultados experimentais indicaram que essa abordagem melhora a eficiência e a precisão da estimativa do comprimento dos peixes, reduzindo informações desnecessárias e superando o desempenho do algoritmo SGBM original.

Começaram pela calibração da câmara para corrigir a distorção da imagem causada. No processo, utilizaram uma ferramenta do MATLAB *Stereo Camera Calibrator Toolbox*, como se pode observar os resultados na figura 2.39.

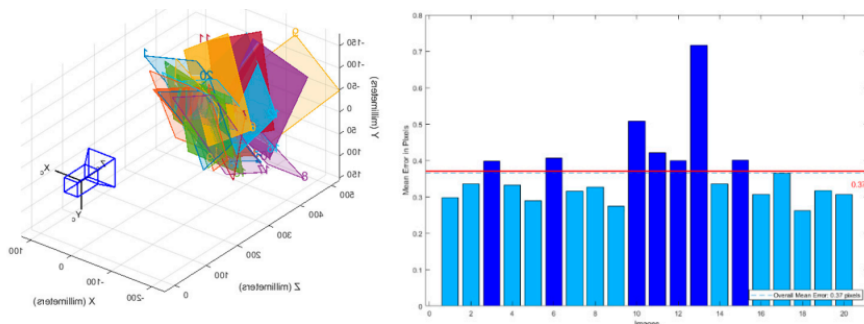


Figura 2.39: Resultados da calibração [28]

Em seguida, foi treinado numa Rede Totalmente Convolutiva (FCN) o conjunto de dados do Fish4Knowledge, e realizaram experiências com o modelo M1 que é o do *dataset* público e o modelo M2 que foi com imagens *selfmade*. No entanto, o modelo M2 não apresentou bons resultados devido à segmentação. Dado que existem diferenças no modelo M1 relativamente ao ambiente e formato dos peixes, foi decidido juntar ao *dataset* existente mais imagens e, criando assim o modelo M2 para diminuir a entropia. Como se pode observar na figura 2.40.

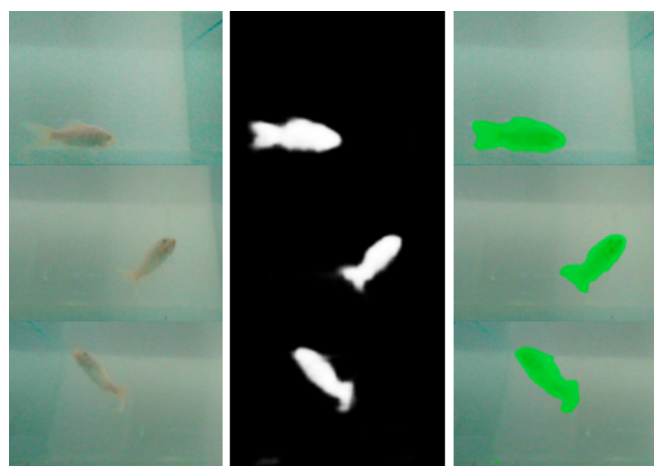


Figura 2.40: Resultados do modelo M2 [28]

Para a estimativa de profundidade, foi utilizado o mapa de disparidade, na qual

foi testado vários filtros de pré-processamento para destacar características significativas. As comparações entre os mapas de disparidade gerados a partir da imagem original e da imagem pré-processada, onde se destacam as diferentes cores e variações no processamento, totalizando 11 métodos. Nos mapas de disparidade gerados, os valores na área geral do objeto foram similares entre os métodos, mas o *Guided Image Filter* demonstrou melhor separação do objeto em relação ao fundo. Por essa razão, o *Guided Image Filter* foi adotado para o pré-processamento.

Por fim, o comprimento corporal do peixe é estimado com base na posição da cabeça e da cauda. Após identificar a localização desses pixels, o comprimento do corpo do peixe pode ser calculado. A estimativa do comprimento do peixe na imagem é apresentada na figura 2.41 e o resultado da experiência na figura 2.42, tendo sido realizada em diferentes profundidades e uma medição de 10 cm de comprimento.

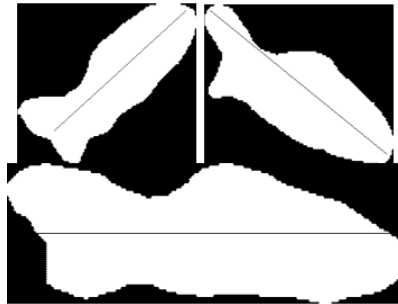


Figura 2.41: Comprimento do objeto na imagem [28]

Esse estudo demonstra que a combinação de técnicas de *deep learning* com métodos tradicionais de reconstrução 3D pode otimizar significativamente a medição de organismos subaquáticos. Tais avanços são essenciais para aplicações em monitorização da vida marinha, manejo da pesca e conservação ambiental, permitindo medições não invasivas e de alta precisão em ambientes aquáticos naturais.

### 2.2.5 Análise Comparativa

Nesta secção, irá ser apresentada e analisada os diferentes métodos de captação de plâncton, bem como os sistemas de aquisição de peixes juvenis. Será apresentada uma análise comparativa onde serão enumeradas algumas características vantajosas e desvantagens entre os diferentes tipos de sistemas.

Começando pelo tema referente aos **sistemas de captação de plâncton**, graças à evolução das novas tecnologias, existem métodos mais eficazes de captação, novos sistemas capazes de realizar classificações e contagem de alvos *in situ*, revelando-se muito vantajoso comparado com o método tradicional que seria a recolha da amostra e ser levada para as instalações próprias para avaliação.

Depth (mm)	Body Length (mm)	Image No.
450–500	94.9682	7
500–550	95.3670	10
550–600	96.9442	24
600–650	95.8932	19

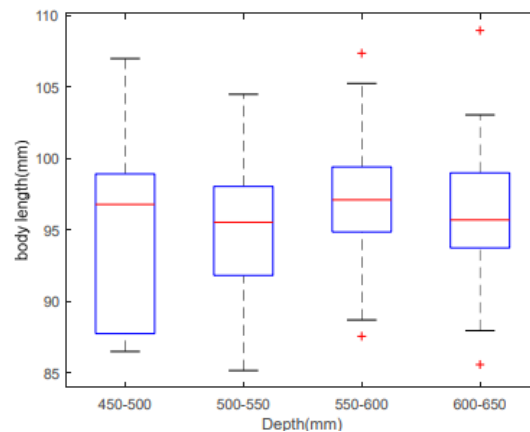


Figura 2.42: Profundidade e o comprimento correspondente do corpo [28]

O VPRII é um sistema consolidado e amplamente utilizado em campanhas oceanográficas, concebido para ser rebocado por navios e capaz de operar em profundidades que podem ultrapassar mil metros. A sua arquitetura combina câmeras de vídeo com iluminação estroboscópica de alta intensidade, permitindo registrar organismos em diferentes escalas de tamanho, desde cerca de 0,1 milímetro até vários centímetros. A grande vantagem do VPRII é possibilitar o mapeamento sinótico de grandes áreas, gerando perfis tridimensionais da comunidade planctônica em alta resolução. Contudo, apresenta como limitação a necessidade de logística complexa, envolvendo navio, equipe especializada e subsequente processamento volumoso de dados.

O ZOOVIS, por sua vez, foi projetado com foco em ambientes estuarinos e costeiros caracterizados por elevada turbidez. O sistema recorre ao princípio de *shadowgraph*, no qual os organismos são visualizados como silhuetas contra um fundo iluminado. Essa configuração permite a aquisição de imagens de boa qualidade mesmo em condições de elevada concentração de partículas suspensas, além de possibilitar a amostragem de volumes relativamente elevados de água por unidade de tempo. Assim, o ZOOVIS é particularmente adequado para ambientes produtivos e dinâmicos, mas apresenta menor flexibilidade quando se busca a identificação detalhada de organismos muito pequenos.

O GUARD1, constitui uma solução mais recente e de baixo custo relativo, concebida para a detecção e reconhecimento automático de organismos gelatinosos, como

medusas, diretamente no ambiente marinho. Diferentemente do VPRII e do ZOO-VIS, este sistema é compacto, autônomo e pode ser instalado em fundeios, rosetas ou perfis, o que lhe confere elevada versatilidade. Uma característica marcante do GUARD1 é a integração de algoritmos de reconhecimento embarcados, o que permite reduzir a dependência de análises posteriores em laboratório. Apesar disso, o seu escopo taxonômico é mais restrito, sendo menos indicado para o estudo de comunidades planctônicas mais diversas.

Por fim, a Scripps Plankton Camera (SPC) apresenta uma abordagem diferenciada ao privilegiar séries temporais contínuas em pontos fixos, como píeres, boias e estações lacustres. O sistema opera com microscopia em campo escuro (*dark-field*), utilizando LEDs pulsados e objetivas telecêntricas, o que garante a captura de imagens de elevada qualidade tanto de micro quanto de meso-plâncton. Além disso, a SPC integra uma infraestrutura de processamento e armazenamento em servidor, com suporte a algoritmos de *machine learning* para a classificação automática das imagens. Esta arquitetura torna o sistema particularmente adequado para estudos ecológicos de longo prazo, mas limita a sua aplicação a locais fixos, não sendo adequado para mapeamento em larga escala.

As principais características dos sistemas de aquisição de imagens de plâncton, segue-se a tabela 4.3 com uma comparação das diferentes especificações.

Tabela 2.1: Comparação dos principais parâmetros dos sistemas de imageamento planctônico (VPRII, ZOOVIS, GUARD1 e MINI-SPC).

Parâmetros	VPRII	ZOOVIS	GUARD1	MINI-SPC
Câmera	Pulnix 1040 (CCD)	Câmara com sensor CCD de 12 bits	CANON GX1	Point Grey Grasshopper 3 (Sony ICX814)
Resolução (MP)	1	5	12.8	9.1
<i>Pixel Size</i>	9 $\mu\text{m}$	10.8 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$	3.69 $\mu\text{m}$
FPS	30	15	30	9
<i>Shutter</i>	Rolling, 6.25 $\mu\text{s}$ – 1 s	-	Global 25 $\mu\text{s}$ – 1 s	Global, 4 $\mu\text{s}$ – 1 s
Lente	12.5–75 mm ajustável	28–300 mm ajustável	-	0.508 $\times$ TC2MHR096-C (Opto Engineering)
Volume de imagem (L/s)	0.9	3.6	-	0.0096
Iluminação	<i>Xenon bulb</i>	LED (625 nm, colimado)	LED	LED <i>Darkfield</i>
<i>Software de Classificação</i>	Próprio [18]	Próprio [19]	Próprio [20]	Próprio [22]

Relativamente ao uso de câmaras holográficas, impunha bastantes limitações aos sistemas. Entre elas destacam-se as dificuldades no pós-processamento necessário para revelar as imagens holográficas, bem como as restrições impostas pelo suporte físico (fitas) relativamente à taxa de aquisição e ao número de hologramas que podiam ser capturados. Tal como os métodos tradicionais de captura por rede, estes sistemas também apresentam um custo operacional elevado.

Com o advento de novas tecnologias para aquisição holográfica, surgiram sistemas modernos que utilizam câmaras digitais. Esta área continua a ser pouco explorada, e o foco principal destes novos sistemas não se centra tanto na classificação dos organismos, mas sim na captação e reconstrução de imagens tridimensionais, permitindo uma visão mais completa do comportamento do plâncton no seu ambiente natural. Alguns destes sistemas avançados permitem ainda a captura de vídeos holográficos, possibilitando a aquisição de hologramas em quatro dimensões (espaço e tempo). Com isto, no intuito desta dissertação, não serão mais abordados estes sistemas devido a não irem ao encontro com os objetivos pretendidos.

O tema seguinte e principal do objetivo desta dissertação, são os **sistemas de aquisição e identificação de peixes juvenis**, os dois trabalhos recentes abordados na secção 2.2.4 abordam a utilização de técnicas de visão computacional para identificação e medição de peixes em ambientes subaquáticos, embora com efeitos distintos. O estudo “**Automatic Coral Reef Fish Identification and 3D Measurement in the Wild**” [27] propõe um pipeline automatizado para identificar, seguir e medir peixes em recifes de corais utilizando imagens estéreo. A metodologia integra reconstrução tridimensional, localização de indivíduos e análise populacional em ambientes naturais, permitindo a monitorização ecológica e o estudo do comportamento de peixes em seu habitat, com aplicação direta na avaliação da saúde de ecossistemas marinhos. A diferença está na capacidade de análise em tempo real e no foco em ambientes naturais e não controlados, características importantes para pesquisas em ecologia marinha.

Por outro lado, o artigo “**Underwater Fish Body Length Estimation Based on Binocular Image Processing**” [28] foca especificamente na estimativa do comprimento corporal de peixes, utilizando processamento de imagens binoculares combinado com redes neurais convolucionais totalmente conectadas (FCN) e o algoritmo Semi-Global Block Matching (SGBM) para cálculo de profundidade. Este estudo é mais direcionado a ambientes subaquáticos controlados, como tanques de aquicultura, e busca precisão na medição do comprimento corporal, sendo útil para monitorização de crescimento e avaliação de saúde de peixes.

Comparativamente, o primeiro estudo se destaca por abordar identificação e localização em 3D em condições naturais, com aplicação em ecossistemas complexos e monitorização ambiental, enquanto o segundo apresenta uma abordagem mais voltada para ambientes controlados, com foco em métricas corporais precisas, sendo

especialmente relevante para aquicultura e pesquisa de comportamento de peixes. A escolha entre os métodos depende, portanto, do objetivo: estudo ecológico em ambientes naturais ou mensuração precisa em ambientes controlados.

## Capítulo 3

# Fundamentos

### 3.1 Fundamentos Óticos

Aquisição de imagens é uma área essencial no desenvolvimento da tecnologia moderna que proporciona a captura, processamento e análise de imagens com alta resolução e precisa. Envolve um processo físico e eletrónico que converte a luz refletida por objetos em uma representação digital, tipicamente sensores como CCDs (*Charged Coupled Devices*) e CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), são capazes de converter luz em sinais elétricos.

Os tópicos serão descritos e divididos consoante o seu tema relevante, em 3.1.1 são abrangidos os conceitos teóricos envolventes na área da imagem e ótica, na qual se introduz a abertura do diafragma, campo de visão e profundidade de campo. Por outro lado, um entendimento sobre a iluminação é relevante sobre os vários tipos de aplicação, como o *Front Lightning* e *Back Lightining*.

#### 3.1.1 Conceitos

##### Campo de Visão (FOV)

O campo de visão (FOV) é a área aberta e observável que uma pessoa pode ver através dos seus olhos ou através de um dispositivo ótico, como uma câmara. No caso dos dispositivos óticos, o FOV é a área máxima que o dispositivo pode captar. Por outras palavras, responde à pergunta: "Quanto é que o dispositivo consegue ver?".

Na figura 3.1, consegue-se extrapolar que quanto mais amplo for o FOV, mais se pode ver do mundo observável. É medido na horizontal, na vertical e na diagonal.

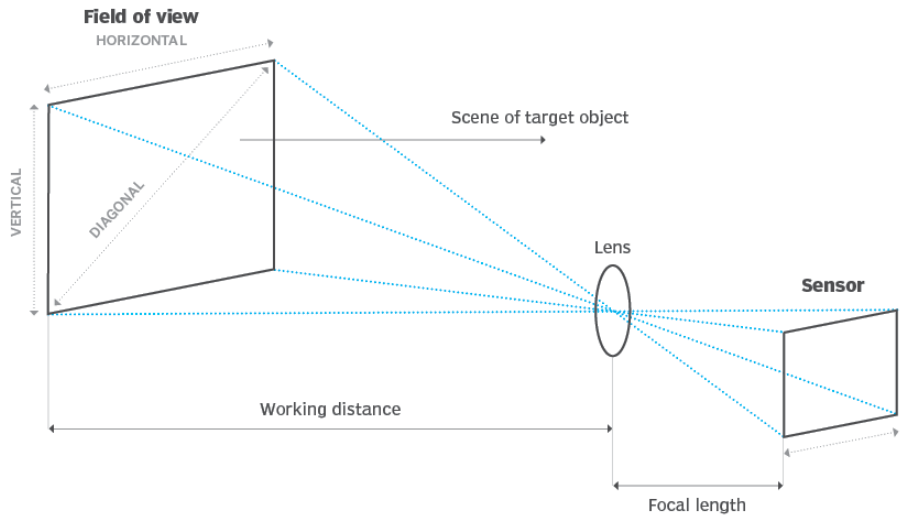


Figura 3.1: Exemplo do Campo de Visão (FOV)  
[29]

### Distância Focal

A distância focal da lente descreve a distância entre a lente e a imagem focado no sensor. À medida que a luz passa através da lente, ela converge (distância focal positiva) ou diverge (distância focal negativa), no entanto, nas câmaras, a distância focal é predominante positiva. As distâncias focais mais curtas fazem a luz convergir mais fortemente (ângulo mais nítido). As distâncias focais mais longas em comparação, convergem a luz com menos força (ângulo mais raso) para focar a imagem.

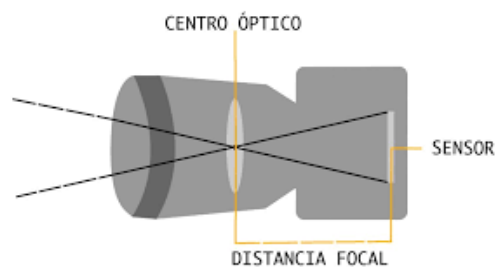


Figura 3.2: Exemplificação da Distância Focal  
[30].

### Relação entre Abertura da Lente e Profundidade de Campo

Quando conhecido os efeitos que a abertura do diafragma pode originar, conseguimos controlar 3 aspetos importantes: a quantidade de luz que atinge o sensor, a profundidade de campo e a nitidez.

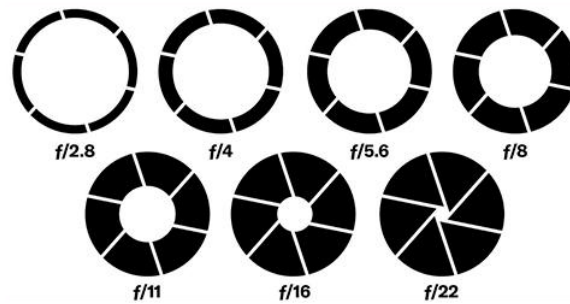


Figura 3.3: Comparação de diferentes diafragmas [31]

O mecanismo da objetiva chamado diafragma, representado como na figura 3.3, abre e fecha, sendo composto por lâminas e por um orifício situado no centro. Dependendo da abertura pretendido (número  $f$  da lente), esse orifício abre ou fecha mais deixando entrar muita ou pouca luz.

A abertura é medida em números " $f$ " também conhecido como F-stops. A escala de f-stops foi feita de forma a que cada f-stop corresponda a uma situação em que o diafragma deixe entrar o dobro (ou metade) da luz do f-stop anterior.[31]

- Um número  $f$  baixo (ex: $f/1.8$ ;  $f/2.0$ ;  $f/2.8$ ) significa uma grande abertura do diafragma, fazendo com que entre mais luz;
- Um número de  $f$  alto (ex: $f/8$ ;  $f/11$ ;  $f/16$ ) significa uma pequena abertura do diafragma, fazendo com que entre menos luz para o sensor da câmara.



Figura 3.4: Comparação entre abertura e fundo nos diafragmas [31]

- **Impacto na exposição:**

A abertura do diafragma determina a quantidade de luz que atinge o sensor, como visto anteriormente, quanto mais abrir a abertura mais luz entra e

quanto mais fechar menos luz. Essa dinâmica tem um impacto direto na exposição e senão compensarmos os valores da velocidade de obturação e o ISO, a imagem poderá ficar sub-exposta ( $n^{\circ} 1$  escura), sobre-exposta ( $n^{\circ} 3$  muita luz) ou corretamente exposta ( $n^{\circ} 2$ ) de acordo com a figura 3.5.



Figura 3.5: Diferentes impactos na imagem relativo à exposição [31]

- **Impacto na profundidade:**

Um impacto da abertura do diafragma, tem a ver com a profundidade de campo, esse termo designa a parte da imagem que fica focada e nítida.

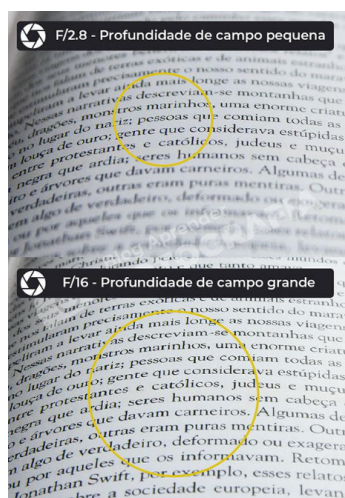


Figura 3.6: Impacto na imagem relativo à profundidade de campo [31]

Portanto quanto maior for a abertura do diafragma, menos será a profundidade do campo. Quanto menor a abertura, maior a profundidade do campo. Como representado na figura 3.7.



Figura 3.7: Impacto na imagem relativo à profundidade de campo [31]

### Relação entre Distância Focal e Campo de Visão

Uma lente de distância focal fixa, também conhecida como lente convencional ou entocêntrica, é uma lente com um campo de visão angular fixo (AFOV), ou seja, ao focar a lente para diferentes distâncias de trabalho (WDs), podem ser obtidos campos de visão (FOV) diferentes, embora o ângulo de visão seja constante. De notar que objetivas de distância focal fixa podem ser focadas para diferentes distâncias e as lentes de focagem é apenas para uma única distância focal específica.[32]

O AFOV é especificado como o ângulo total (em graus) associado à dimensão horizontal (largura) do sensor com a qual a objetiva será utilizada.

A distância focal de uma lente define o AFOV, para um determinado tamanho de sensor, quanto menor for a distância focal, maior será o AFOV.

$$AFOV = 2 \times \tan^{-1} \frac{H}{2f} \quad (3.1)$$

Na figura 3.8, representa uma lente convexa simples e fina, a distância focal é a distância entre a superfície posterior da lente e o plano da imagem formada por um objeto colocado infinitamente à frente da lente. Por esta definição de equação 3.1, a lente está relacionada com a distância focal ( $f$ ) e o tamanho do sensor ( $H$ ).

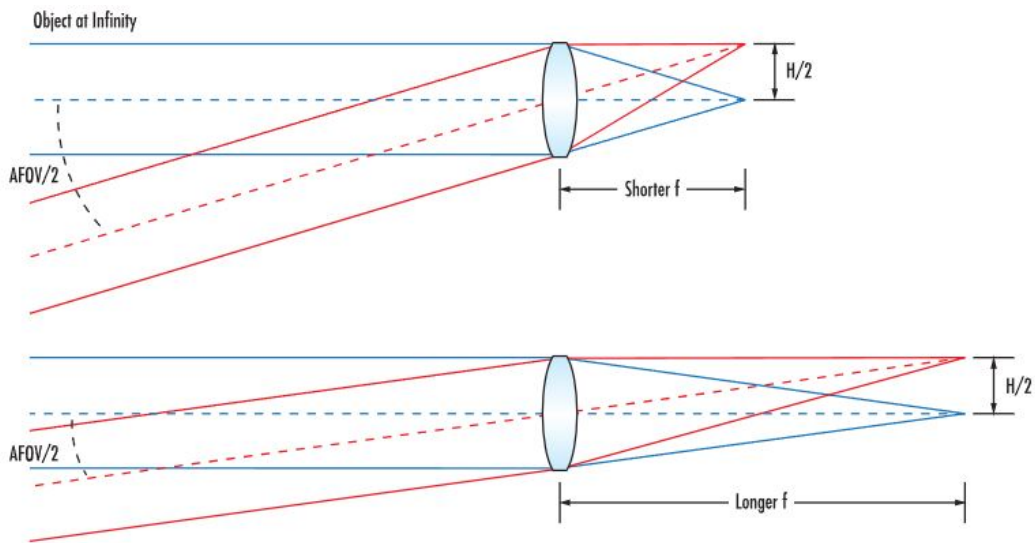


Figura 3.8: Para um determinado tamanho de sensor,  $H$ , a distância focal mais curta produz AFOV mais amplo [32]

### Campo de Visão varia com o Tamanho do Sensor

O campo de visão é a área máxima de uma amostra que um câmara consegue captar. É uma relação entre a distância focal da objetiva e o tamanho do sensor. Partindo do princípio de que a distância focal da objetiva é a mesma, quanto maior for o sensor, maior será o campo de visão. [30]

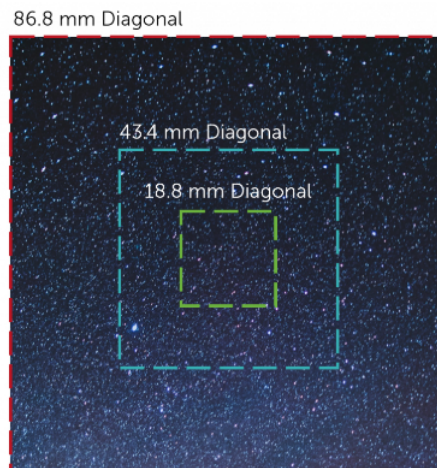


Figura 3.9: Comparação de diferentes tamanhos de sensores [30]

Na figura 3.9 demonstra que aumentando o tamanho do sensor contribuí para um maior campo de visão. Em que a linha azul (4096 x 4096 pixels) e a linha vermelha (2048 x 2048 pixels) indica um sensor de  $15 \times 15 \mu\text{m}$  pixels, enquanto a linha verde (1024 x 1024 pixels) indica um sensor de  $13 \times 13 \mu\text{m}$  pixels.

### Princípio de medição de distância binocular

A medição de distância binocular é um princípio que simula a medição de distância binocular biológica. As imagens da esquerda e da direita são obtidas pela câmara binocular, e as imagens adquiridas são transmitidas para o computador para análise e cálculo da paralaxe, obtendo-se assim as informações espaciais tridimensionais do objeto alvo. Numa situação ideal, a medição de distância binocular é obtida por duas câmaras idênticas e paralelas, e as informações de distância do alvo são calculadas.

O seu diagrama esquemático é mostrado na Figura 3.10: Suponha que P seja o alvo a ser medido,  $O_l$  e  $O_r$  são os centróides fotográficos das câmaras esquerda e direita, e  $T$  é a distância do centróide fotográfico entre as câmaras esquerda e direita, também conhecida como distância de base,  $f$  é a distância focal da câmara,  $P_l$  e  $P_r$  são as coordenadas do ponto P no sistema de coordenadas da imagem das câmaras esquerda e direita, e  $Z$  é a distância vertical do ponto P até a câmara.

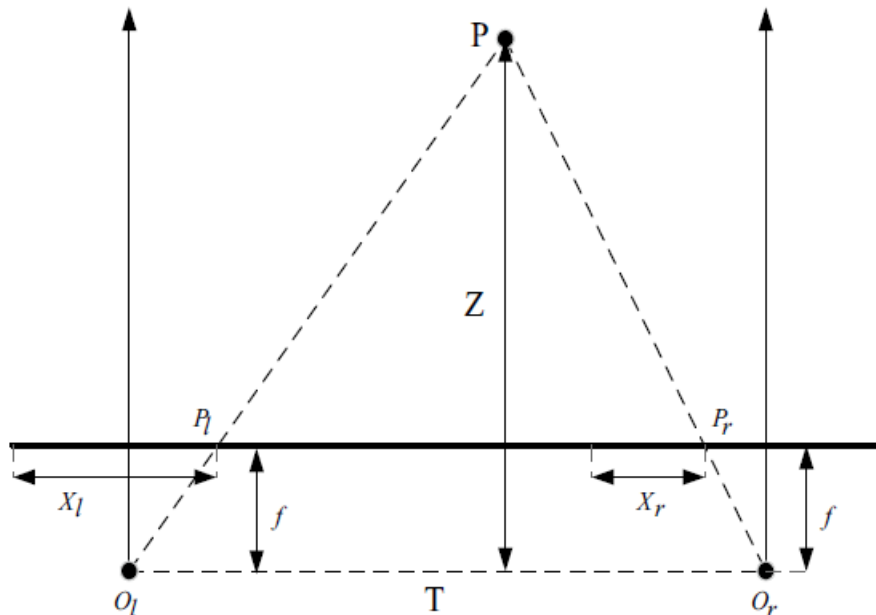


Figura 3.10: Princípio da medição de distância binocular [33]

Como se pode observar na Figura 3.10,  $\Delta PP_lP_r \sim \Delta PO_lO_r$ , fórmula 3.2 pode ser obtida por:

$$\frac{T - (X_l - X_r)}{T} = \frac{Z - f}{Z} \quad (3.2)$$

Então, a expressão da distância  $Z$  entre o alvo a ser medido e a câmara pode ser derivada da seguinte forma: Fórmula 3.3:

$$Z = \frac{f \cdot T}{X_l - X_r} = \frac{f \cdot T}{d} \quad (3.3)$$

Onde,  $X_l$  e  $X_r$  são as coordenadas horizontais dos pontos de pixel nas imagens esquerda e direita do ponto  $P$ , respetivamente,  $d$  é a paralaxe entre as câmaras esquerda e direita,  $d = X_l - X_r$ , e a distância focal  $f$  e a distância de base  $T$  podem ser obtidas através da calibração da câmara. Portanto, a informação de distância do alvo a ser medida pode ser obtida apenas através da obtenção da paralaxe  $d$ .

No sistema de visão estéreo binocular, o objetivo principal é converter coordenadas espaciais tridimensionais em coordenadas de pixel, e a relação entre os quatro sistemas de coordenadas envolvidos é mostrada na Figura 3.11.

Onde:

- **Sistema de coordenadas da imagem ( $x, y$ ):** O sistema de coordenadas tem o centro da imagem  $O_i$  como a origem, com o eixo  $x$  e o eixo  $y$  direcionados horizontalmente e verticalmente, respetivamente. O comprimento físico do pixel unitário nos eixos  $x$  e  $y$  é  $d_x$  e  $d_y$ , respetivamente.
- **Sistema de coordenadas de pixels ( $u, v$ ):** A origem  $O_o$  deste sistema de coordenadas está no canto superior esquerdo da imagem, e os eixos  $u$  e  $v$  são paralelos aos eixos do sistema de coordenadas da imagem, sendo principalmente usados para descrever a posição de um ponto específico na imagem.
- **Sistema de coordenadas da câmara ( $X_C, Y_C, Z_C$ ):** Este sistema de coordenadas tem o centro ótico da câmara  $O_c$  como origem, e o sistema de coordenadas da imagem é uma relação de projeção de transmissão. Assim, os eixos  $X$  e  $Y$  do sistema são consistentes com as direções horizontal e vertical da imagem, e o eixo  $Z$  é paralelo ao eixo ótico da lente. A distância entre a origem do sistema de coordenadas da câmara e a origem do sistema de coordenadas do plano da imagem é a distância focal da câmara.
- **Sistema de coordenadas do mundo ( $X_W, Y_W, Z_W$ ):** Este sistema de coordenadas é um sistema absoluto no espaço real, utilizado para determinar a posição relativa da câmara e do alvo no espaço, e a origem pode ser escolhida subjetivamente.

A conversão entre os quatro sistemas de coordenadas é mostrada na Figura 3.12: Se  $O_i$  for definido como  $(u_0, v_0)$  no sistema de coordenadas de pixels, a relação correspondente de um ponto no plano de imagem no sistema de coordenadas de pixels  $p(x, y)$  é mostrada na fórmula 3.4.

$$\begin{cases} u = \frac{x}{d_x} + u_0 \\ v = \frac{y}{d_y} + v_0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Escrito na forma de matriz como na fórmula 3.5:

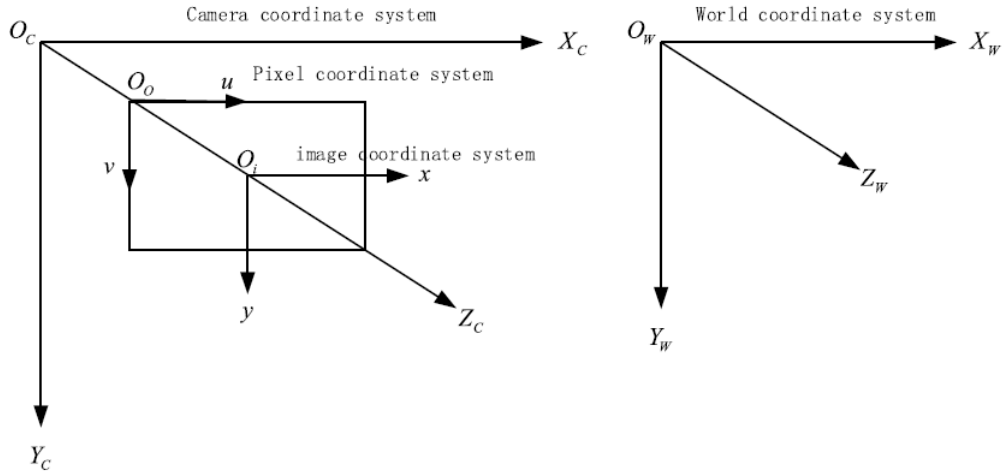


Figura 3.11: Diagrama de relação dos quatro sistemas de coordenadas [33]

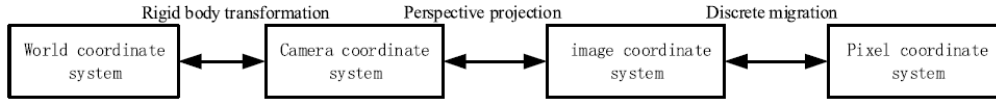


Figura 3.12: Diagrama de transformação dos quatro sistemas de coordenadas [33]

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

De acordo com o princípio da semelhança triangular, a relação correspondente entre o ponto  $P(X_C, Y_C, Z_C)$  no espaço e o ponto  $p$  no plano de imagem pode ser obtida como mostrado na fórmula 3.6:

$$\begin{cases} x = f \frac{X_C}{Z_C} \\ y = f \frac{Y_C}{Z_C} \end{cases} \quad (3.6)$$

onde  $f$  é a distância focal da câmara. Então, a forma de transformação linear homogênea pode ser expressa como na fórmula 3.7:

$$Z_C \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Substituindo a fórmula 3.7 na fórmula 3.5, obtém-se a relação correspondente entre o ponto  $P$  no espaço e o sistema de coordenadas de píxeis, como mostrado na

fórmula 3.8:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{Z_C} \begin{pmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{Z_C} \begin{pmatrix} \frac{f}{d_x} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{d_y} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

A conversão entre o sistema de coordenadas do mundo e o sistema de coordenadas da câmara só precisa ser realizada através da matriz de rotação  $R$  e do vetor de translação  $T^{[k,l]}$ . Então, a relação correspondente é mostrada na Fórmula 4.4:

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Substituindo a fórmula 4.4 na fórmula 3.8, obtém-se a correspondência entre o sistema de coordenadas do mundo e o sistema de coordenadas de píxeis, como mostrado na fórmula 4.5:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{Z_C} \begin{pmatrix} \frac{f}{d_x} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{d_y} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Simplificado como na fórmula 4.6:

$$Z_C \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = M_1 M_2 \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

onde,  $M_1$  representa a matriz de parâmetros internos da câmara;  $M_2$  representa a matriz de parâmetros externos da câmara.

### Análise do modelo de imagem subaquática

Durante a propagação da luz do objeto subaquático até a lente da câmara, ela sofre duas refrações, que ocorrem na interface entre a água e o vidro e na interface entre o vidro e o ar. Como o vidro é fino e uniforme em textura, o efeito de refração da placa de vidro pode ser ignorado. As duas refrações são equivalentes a uma única refração da água para o ar. Para facilitar o estudo, assumimos que o eixo ótico da câmara é perpendicular ao plano de refração. Após a equivalência acima, o modelo de imagem subaquática pode ser simplificado para a Figura 3.13.

Na Figura 3.13,  $P(X_W, Y_W, Z_W)$  é o ponto alvo a ser medido,  $O_1$  é a posição real da câmara,  $O_2$  é o ponto de interseção da linha de extensão da luz incidente na água com o eixo ótico da câmara, que é considerado a posição virtual da câmara,  $O$  é o ponto de refração da luz incidente na interface entre a água e o ar,  $A$  é o ponto de interseção do eixo ótico da câmara com a interface entre a água e o ar,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são, respetivamente, os ângulos de incidência e refração.  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração da água e do ar, respetivamente. De acordo com a semelhança de triângulos e a lei da refração  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ , pode-se obter:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.12)$$

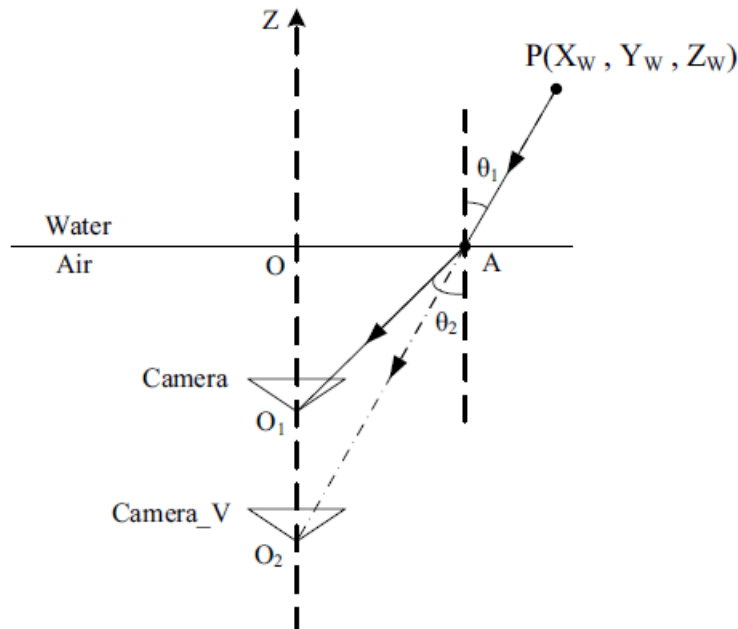


Figura 3.13: Modelo de imagem subaquática [33]

Como o eixo ótico da câmara real e da câmara virtual coincidem, a projeção do comprimento  $OA$  nas duas câmaras é a mesma, ou seja,  $X_1 = X_2$ , onde  $X_1$  e  $X_2$  são os comprimentos de imagem de  $OA$  na câmara real e na câmara virtual, respetivamente. Como resultado:

$$\frac{X_1}{OA} = \frac{f_1}{OO_1} \quad (3.13)$$

$$\frac{X_2}{OA} = \frac{f_2}{OO_2} \quad (3.14)$$

De acordo com as fórmulas 3.13 e 3.14:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{OO_1 \tan \theta_1}{OO_2 \tan \theta_2} \quad (3.15)$$

Combinando as equações 3.12 e 3.15, obtemos:

$$\frac{f_1}{f_2} = \sqrt{\frac{((n_2/n_1)^2 - \sin^2 \theta_1)}{1 - \sin^2 \theta_1}} \quad (3.16)$$

Na figura,  $P$  é o ponto de coordenadas tridimensionais,  $p_2$  é o ponto de imagem real,  $p_1$  é o ponto de imagem ignorando a refração,  $f$  é a distância focal,  $d$  é a distância da câmara ao plano à prova de água,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são, respectivamente, o ângulo de incidência e o ângulo de refração. A seguinte relação pode ser obtida através de relações geométricas:

$$x_1 = f \frac{X_W}{Z + d} \quad (3.17)$$

$$x_2 = f \tan \theta_2 \quad (3.18)$$

Das fórmulas 3.17 e 3.18:

$$\frac{x_2}{x_1} = \tan \theta_2 \frac{(Z + d)}{X_W} \quad (3.19)$$

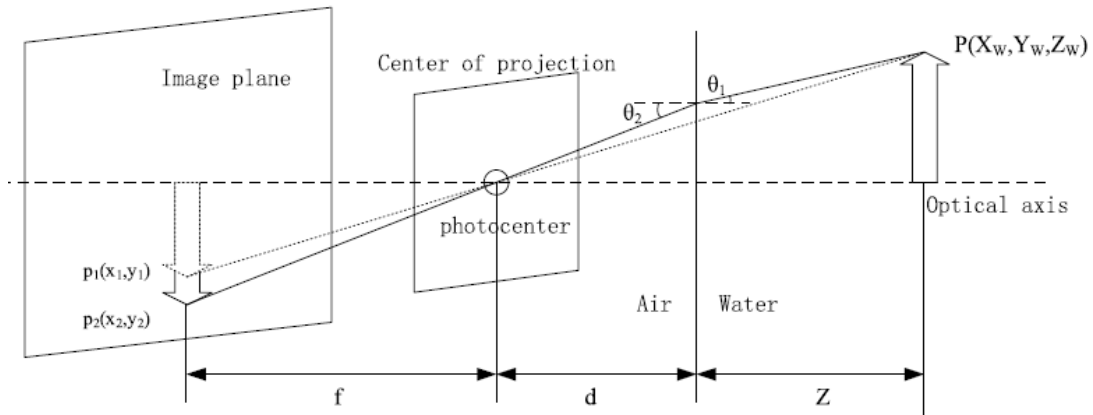


Figura 3.14: Diagrama da distorção causada pela refração subaquática [33]

Dado que  $X_W \gg d$ , de acordo com  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ , podemos obter:

$$\frac{x_r}{x_v} = \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} = \frac{\tan \theta_2}{\tan \left( \arcsin \left( \frac{n_2 \sin \theta_2}{n_1} \right) \right)} \quad (3.20)$$

Pode-se observar que a distância entre o ponto de imagem e o centro da imagem e a distância entre o ponto luminoso e o eixo óptico não é mais uma relação linear no modelo de imagem de orifício, mas uma relação não linear, o que causa desvio de imagem e intensifica a distorção da imagem, e a distorção torna-se mais evidente com o aumento da distância.

Através da análise acima, verifica-se que o desvio causado pela refração subaquática pode ser parcialmente corrigido pela mudança equivalente na distância focal. No entanto, este desvio não é linear, e para a parte não linear, é necessário corrigir utilizando o polinómio de correção de distorção de imagem.

De acordo com a análise de imagem subaquática, verifica-se que a refração subaquática tem dois efeitos principais na câmara:

(1) A distância focal equivalente da câmara muda, e a mudança na distância focal pode ser considerada como o produto da distância focal original e a razão do índice de refração num certo ângulo de visão;

(2) A distorção da imagem é intensificada, de modo que a correção de distorção anterior não atende ao uso subaquático, e a distorção aumenta com o aumento da distância do centro da imagem, semelhante à distorção de almofada.

Para garantir a precisão da medição de distância e tamanho de alvos subaquáticos, a seguinte fórmula é utilizada para corrigir a distorção e garantir a precisão da medição do sistema.

(1) À medida que a distância do ponto de imagem ao centro da imagem aumenta, a distorção radial aumenta correspondentemente, portanto, funções polinomiais de segunda ordem e superiores relacionadas à distância são utilizadas para corrigir a distorção radial. A fórmula de correção de distorção radial é a seguinte:

$$\begin{cases} x_r = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \\ y_r = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \end{cases} \quad (3.21)$$

Na fórmula,  $(x, y)$  são as coordenadas do ponto de distorção na imagem antes da correção,  $(x_r, y_r)$  são as coordenadas do ponto de distorção na imagem após a correção,  $r$  é a distância do ponto de distorção ao centro da imagem, e  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são os coeficientes de distorção radial.

(2) O eixo óptico da lente não é perpendicular ao plano da imagem, causando distorção tangencial. A fórmula de correção de distorção tangencial é a seguinte:

$$\begin{cases} x_t = x + 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y_t = y + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy \end{cases} \quad (3.22)$$

Na fórmula,  $p_1$  e  $p_2$  são os coeficientes de distorção tangencial.

### 3.1.2 Tipos de Lentes

Nesta secção 3.1.2, é apresentado os três tipos de lentes telecêntricas: *object-side telecentric lenses*, *image-side telecentric lenses* e *bi-telecentric lens*.

#### **Object-side Telecentric lenses**

O modelo da lente telecêntrica *object-side* pode ser simplificado para uma lente com a pupila de entrada no infinito. Como mostra a figura 3.15, é acrescentado uma abertura no seu plano focal posterior para limitar o ângulo da luz de imagem.

A luz emitida a partir do ponto  $\mathbf{P}$  é fotografada no ponto  $\mathbf{p}$  pelo feixe que passa apenas por esta abertura. Este modelo de imagem possui uma distância focal fixa entre a lente e o sensor da câmara para que o raio principal possa permanecer inalterado enquanto o objeto se aproxima ou se afasta ao longo do eixo óptico.

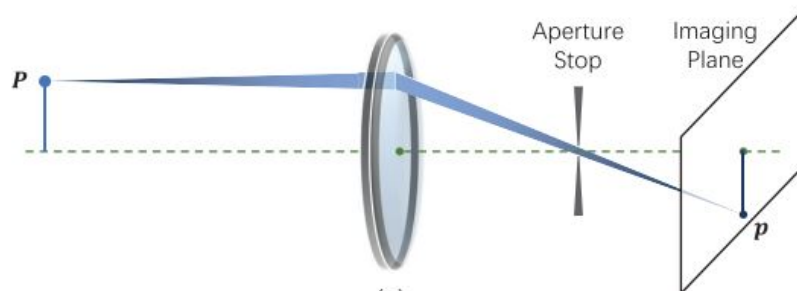


Figura 3.15: Modelo óptico de um *object-side telecentric lens* [34]

Algumas lentes telecêntricas do lado do objeto fornecem uma função de focagem manual para facilitar a medição de objetos a diferentes distâncias. No entanto a telecentricidade da lente perde-se quando a distância ao objeto é demasiado longa porque a primeira lente substituirá gradualmente o *Aperture Stop* como a abertura de todo o sistema de imagem.

#### ***Image-side Telecentric lenses***

A *Image-side telecentric lenses* têm características opostas às da lente telecêntrica *object-side*. A sua pupila de saída situa-se no infinito, através da adição de um batente de abertura no plano focal no espaço-objeto representado na figura 3.16. Uma pupila de saída no infinito torna a lente telecêntrica do lado da imagem. Esta propriedade minimiza qualquer dependência do ângulo de incidência do sensor ou de qualquer conjunto de prisma divisor de feixe por trás da lente, como um prisma de separação de cores numa câmara de três CCD. A uniformidade da luz de iluminação no lado da imagem também as torna adequadas para fotografia e radiometria.

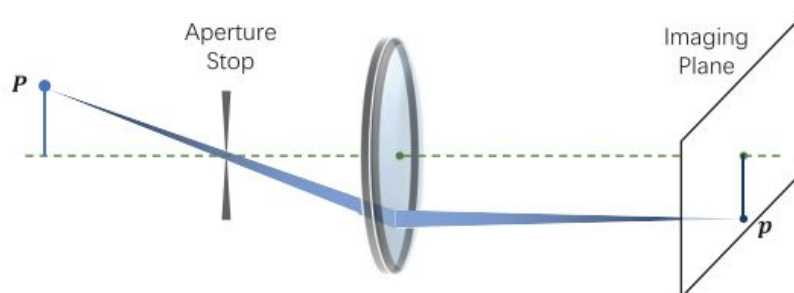


Figura 3.16: Modelo óptico de um *image-side telecentric lens* [34]

#### ***Bi-Telecentric Lenses***

A *Bi-telecentric lens* como representado na figura 3.17 é composto por duas lentes *object-side lens* e *image-side lens*. O plano focal posterior da lente do lado do objeto

coincide com o plano focal anterior da lente do lado da imagem num plano comum onde está colocado um limitador de abertura. Esta abertura coopera com a lente do lado do objeto para formar telecentricidade no espaço do objeto e coopera com a lente da imagem para formar telecentricidade no espaço da imagem.

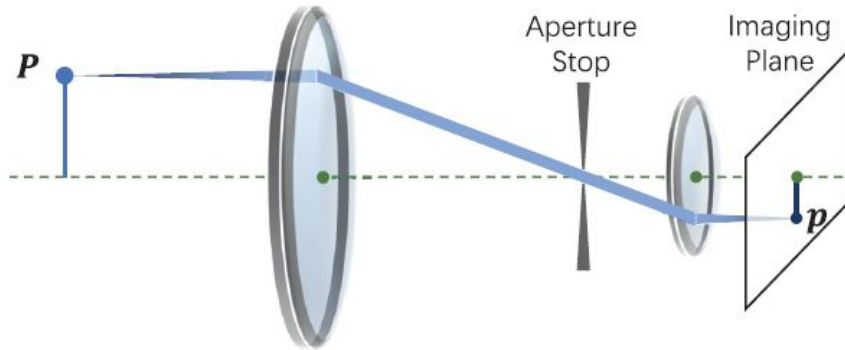


Figura 3.17: Modelo óptico de um *bi-telecentric lens* [34]

A ampliação da lente bi-telecêntrica é determinada pelas distâncias focais dos dois conjuntos de lentes juntos, pelo que, independentemente da distância de trabalho ou da mudança da posição do sensor da câmara, a ampliação óptica não se altera. Esta característica torna a lente bi-telecêntrica mais adequada para o campo de medição baseado no processamento óptico de imagem. No entanto, deve ser respeitada uma distância de trabalho específica quando se aplicam lentes bi-telecêntricas para minimizar a distorção da imagem e manter uma telecentricidade perfeita.[34]

### 3.1.3 Iluminação

Para determinar a melhor iluminação para um sistema em específico, é necessário ter em conta vários aspectos para definir a iluminação certa para o sistema de visão com um grau de confiança.[35]

De longe, o primeiro ponto que deve ficar claro é **objetivo da aplicação**:

- Inspeção à superfície de um objeto para procurar defeitos ou características como texto impresso, é necessário uma iluminação frontal, ou seja, luz proveniente do lado da câmara. O **ângulo de incidência** na superfície do alvo, bem como outras propriedades óticas, como luz difusa ou direta, depende das características específicas da superfície.
- Medição do diâmetro ou comprimento de um objeto ou a localização do orifício de passagem, a melhor opção para maximizar o contraste nas áreas é a retro iluminação, ou seja, a luz é bloqueada pelo objeto no seu caminho para a câmara. A escolha deve ter em conta situações mais complexas, como materiais transparentes, sendo necessário soluções mistas.

Definido o objetivo da aplicação, é importante determinar se é necessário para o sistema uma iluminação frontal ou traseira, surge a necessidade de definir o ângulo em que a luz atinge a superfície do objeto. Embora o ângulo possa variar, existem dois subgrupos importantes: **iluminação de campo claro** e **iluminação de campo escuro**. As quatro combinações representadas na figura 3.18 que se seguem são descritas nas seções seguintes:

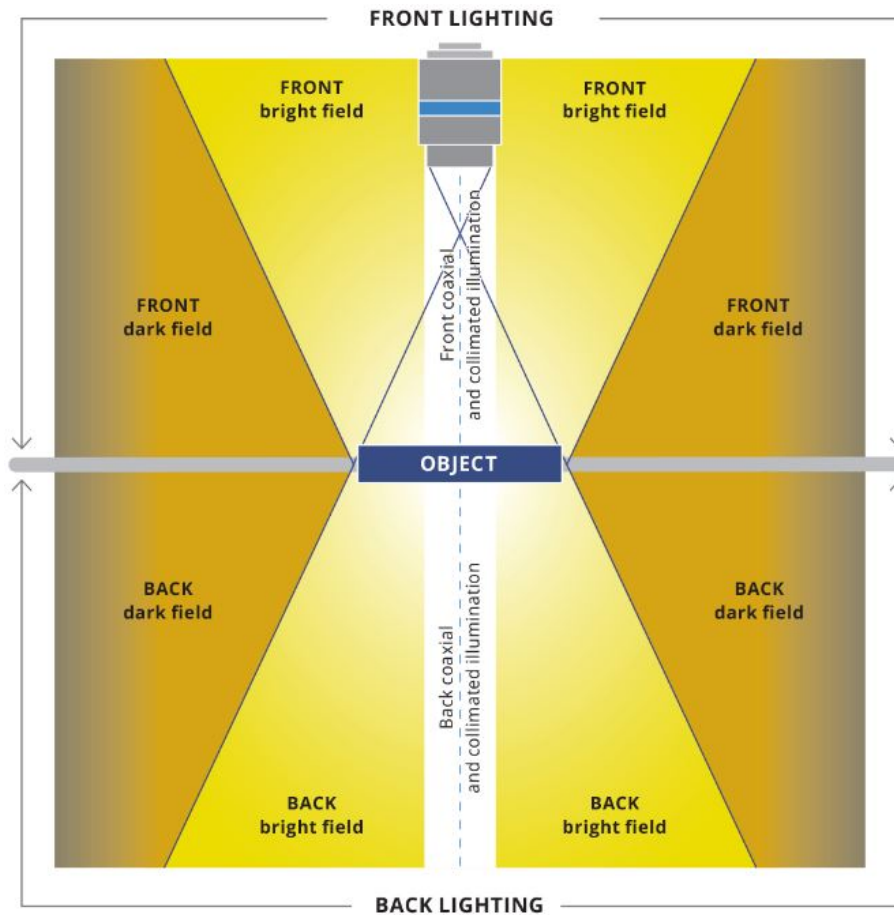


Figura 3.18: Métodos de iluminação [35]

### Iluminação Frontal *Bright Field*

Em iluminação frontal em *Bright Field*, a luz refletida por uma superfície plana é recolhida pela ótica. Este é o procedimento mais comum, em que as características não planas (defeitos, riscos, etc.) podem dispersar a luz fora do ângulo máximo de aceitação da lente, mostrando características escuras em um fundo claro, como demonstrado nas figuras.

Este efeito pode ser produzido por luzes da barra LED ou luzes de anel, dependendo da simetria do sistema. Em ambos os casos, a luz LED pode ser direta ou difundida por um meio (por vezes, é preferível esta opção para evitar uma iluminação desigual em superfícies refletoras).

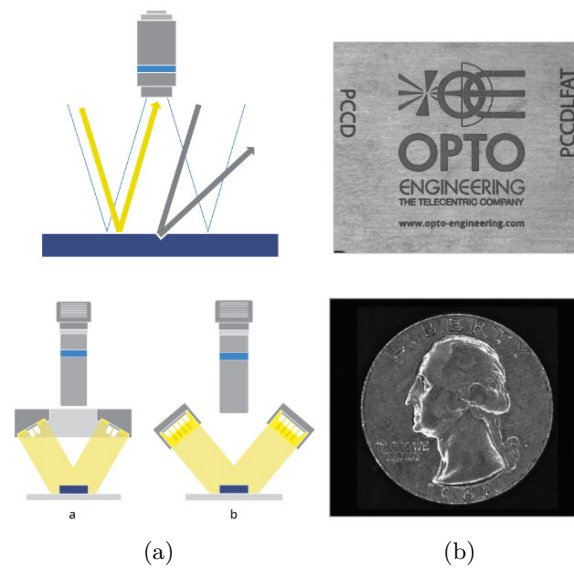


Figura 3.19: (a) Diferentes métodos de iluminação: difusa (a) ou direta (b). (b) Exemplo de projeção sobre um alvo com *Front, Bright Field* [35]

### Iluminação Frontal *Dark Field*

Na iluminação em *Dark Field*, a luz refletida não é captada pelo ótica devido ao ângulo de incidência da luz pela lente. Desta forma, apenas a luz dispersa é captada, realçando as características não planas da superfície como características mais brilhantes num fundo escuro. Na figura 3.20 é demonstrado o efeito do mesmo.

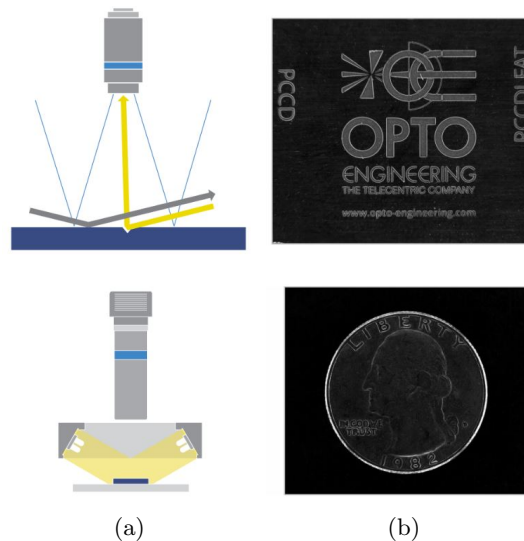


Figura 3.20: (a) Método de iluminação *Dark Field*. (b) Exemplo de projeção sobre um alvo com *Front, Dark Field* [35]

### Iluminação Traseira *Bright Field*

Na iluminação traseira, em *Bright Field*, a luz é interrompida ou transmitida dependendo do material, se o material for opaco é ideal para capturar a sua silhueta, caso for transparente é bom para aplicações de *edge detection*. Na figura 3.21 é demonstrado o efeito do mesmo.

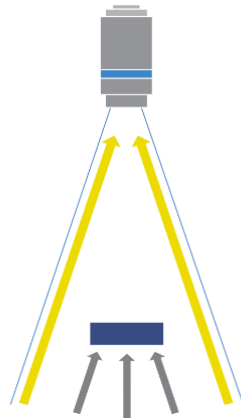


Figura 3.21: Método de iluminação *Back, Bright Field* [35]

Na técnica de retro iluminação difusa, como representado na figura 3.22, é uma técnica mais comum de utilização em que as características não planas do objeto transparente aparecem escuras sobre um fundo branco, o contraste é normalmente baixo, a menos que apresentem curvaturas acentuadas.

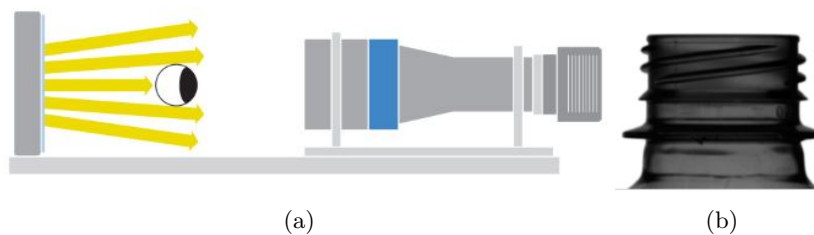


Figura 3.22: (a) Método de retro iluminação difusa. (b) Exemplo de projeção sobre um alvo com *Back, Bright Field* difusa [35]

Por fim, na técnica de iluminação telecêntrica, especificamente concebido para aplicações de alta precisão, como representado na figura 3.23, proporciona ao sistema ótico um aumento de profundidade de campo da lente telecêntrica. Esta técnica é ideal para aplicações de *edge detection* como também para medições de elevada precisão.

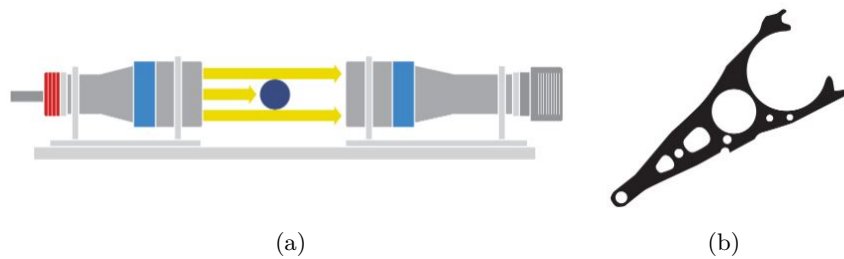


Figura 3.23: (a) Método de iluminação telecêntrica. (b) Exemplo de projeção sobre um alvo com *Back, Bright Field* telecêntrica [35]

### Iluminação Traseira *Dark Field*

Na iluminação traseira, em *Dark Field*, como representado na figura 3.24 apenas a luz emitida pela amostra e dispersa por elementos não planos será recolhida pela lente, realçando os elementos como brilhantes no fundo escuro.

Esta técnica pode ser obtida por meios de luzes circulares ou luzes de barras posicionadas atrás de uma amostra transparente.

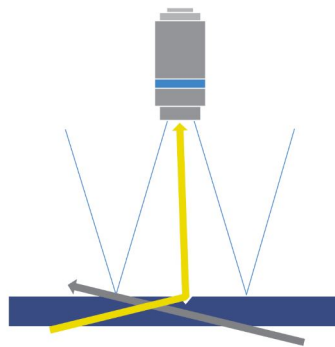


Figura 3.24: Método de iluminação *Back, Dark Field* [35]

Este método de iluminação é especialmente ideal para aplicações de inspeção de objetos de vidro ou plástico. Na figura 3.25, é um exemplo de inspeção que se consegue com este método.



Figura 3.25: Exemplo de inspeção com este método [36]



## Capítulo 4

# Arquitetura do Sistema

### 4.1 Introdução

Neste capítulo são descritas as várias etapas da solução proposta do sistema de aquisição de imagens para peixes juvenis. Este encontra-se dividido em três secções: em 4.2 são apresentados os modos de funcionamento do sistema e requisitos de componentes. Em 4.3 é apresentada a arquitetura de alto nível do *hardware* e do *software*, e em 4.4 são definidos e analisados os componentes selecionados para o sistema e o motivo para a escolha.

### 4.2 Cenário de Operação

O sistema de captação de imagens de peixes juvenis tem como objetivo ser utilizado para analisar a biodiversidade, estudos ecológicos como caracterização de espécies em um dado ecossistema. De forma a ser possível, foram definidos modos de operação que este sistema irá exercer.

- **Manual:** Sistema operado manualmente por uma pessoa em situações como na marginal de um rio, mergulhadores ou em embarcações, que pode ser reposicionado conforme necessário. Este tipo de aplicação é de amostragem rápida e tem facilidade de inspeção visual.
- **Integrado:** Neste modo, o sistema é integrado em plataformas como *ROV*, *AUV*, boias ou estruturas fixas. Este tipo de sistema, é útil devido a ser capaz

de comunicar com outros sistemas, como também ser capaz de utilizar alimentação própria ou externa. Além do mais, ser possível operar remotamente, partilhar imagens ou armazenar.

- **Mooring:** Este tipo de método, serve para instalações a longo prazo para monitorização contínua. Geralmente, é instalado no fundo do mar, ancorada por cabos ou boias. Recolher dados em áreas remotas com pouca intervenção humana. Este tipo de sistema, automaticamente terá que detetar o alvo e recolher os dados.

Dada a informação sobre os diferentes tipos de operações, para o sistema pretendido, vai ser focado inicialmente para uma intervenção manual, para validação do conceito e dos resultados. Posteriormente, irá ser desenvolvido para uma fase mais autónoma de sistema em que poderá ser integrado num veículo autónomo ou instalado para uma monitorização prolongada. Serão divididos os seguintes objetivos para os componentes do sistema:

- **Estrutura Mecânica:**

Sendo para um cenário de operação manual, a estrutura mecânica terá que ser uma estrutura resistente com a capacidade de ser colocado ambas as câmaras e um sistema de iluminação. Sendo para baixa profundidade a validação deste sistema inicial (um a dois metros), poderá ser utilizado perfil de alumínio 4.1 sem a necessidade de testes de pressão.

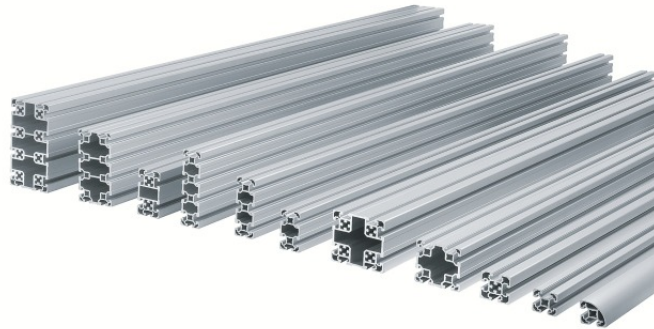


Figura 4.1: Perfis de alumínio

- **Sistema Ótico:**

O sistema binocular é uma parte crítica do projeto, é o que irá definir se é possível observar com mais ou menos detalhe ou *pixeis* o alvo. O interessante seria este sistema ter a melhor resolução possível com melhor pixel/cm, esse tipo de câmaras são altamente dispendiosas. O objetivo para este tópico seria detetar peixes juvenis com um bom *trade off* entre resolução e detalhe com uma região de interesse para uma deteção entre 1 a 5 cm.

- **Sistema de Iluminação:**

O sistema de iluminação é importante porque influencia diretamente nos resultados das imagens. Apesar de a validação dos resultados ser feito inicialmente à superfície, é necessário uma boa iluminação. Com isto, será utilizado sistema de LEDs de alta potência. Este terá que ser capaz de operar sincronizado com o *trigger* de disparo das câmaras.

- **Processamento e Funcionalidades:**

Este sistema irá como se tinha delineado, um modo de operação manual, que significa que o sistema em modo de utilização estará debaixo de água com ligação por cabos à superfície, que estará em comunicação e ser enviado dados para o computador. O utilizador poderá recolher manualmente as imagens e processar mais tarde para análise, ou realizar em tempo real o processamento, que tem um custo de processamento elevado que não é o método ideal. Validado o sistema inicial, será colocado a hipótese de um sistema de processamento avançado.

Sendo inicialmente o cenário manual para validação do sistema, ou seja, controlado pelo utilizador o *trigger* do disparo das câmaras, com a capacidade de observar no computador as imagens em tempo real, na figura 4.2 é demonstrado o possível cenário para validação inicial:



Figura 4.2: Sistema de ótico da *Aqua-Vu* [37]

### 4.3 Arquitetura de Alto Nível do Sistema

Neste capítulo, contém uma visão geral da arquitetura de *hardware* e *software* definida para o projeto. Este esboço de arquitetura será resultado da investigação, discussão e definição dos objetivos pretendidos para este projeto.

#### 4.3.1 Hardware

A arquitetura de *hardware* de alto nível para a solução proposta é bastante simples. Composto por duas câmaras iguais separadas por uma *baseline* a ser definido. Ambas acopladas com uma lente ótica.

O sistema de iluminação deverá iluminar no sentido em que as câmaras estejam orientadas, com uma atenção especial a não estar próximo das lentes das câmaras. Este sistema deverá controlar os LEDs de alta potência em sincronismo com as câmaras.

Para o controlo do sincronismo entre as câmaras e a iluminação, será necessário uma unidade computacional SBC (*Single Board Computer*). Este será responsável por, como definido nos cenários de operação, ligar o computador via USB ao SBC, e enviar comandos de disparo das câmaras e da iluminação sincronizados, bem como alterar definições das câmaras.

De forma, para obter as imagens em tempo real é necessário comunicar entre as câmaras e o computador, então, duas ligações via *ethernet* serão conectadas a um *Switch Port* que por sua vez, que liga ao computador via *ethernet*. Na figura 4.3 é demonstrada a arquitetura do sistema de *hardware* para este projeto.

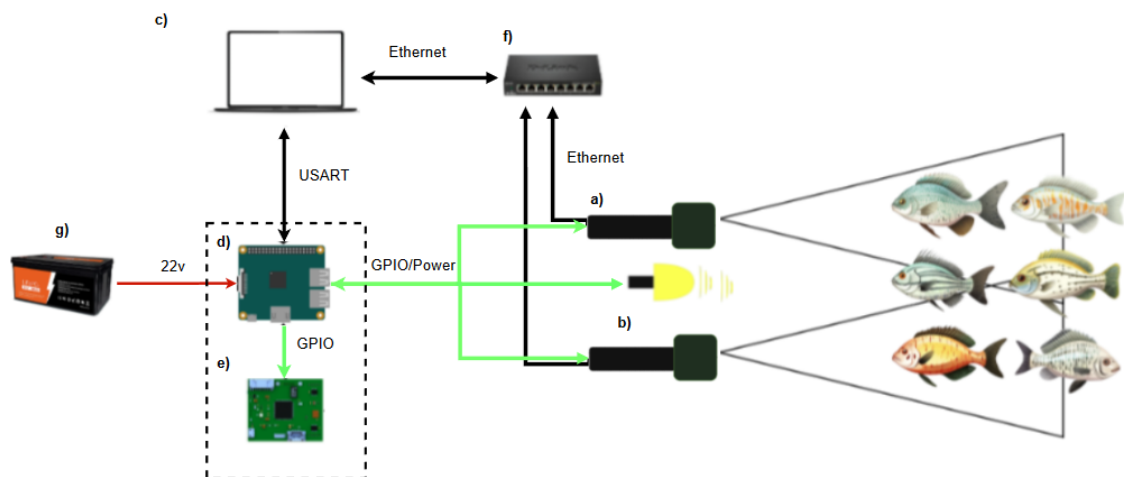


Figura 4.3: Arquitetura de *hardware* de alto nível

a) Par de Câmaras	e) Sistema de Iluminação
b) <i>LEDs</i>	f) <i>Switch Hub</i>
c) Computador	g) Bateria
d) SBC	

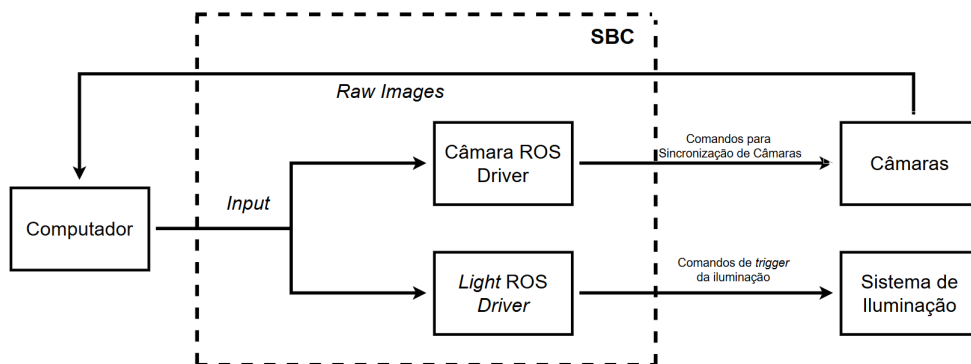
Tabela 4.1: Componentes do Sistema da figura 4.3

### 4.3.2 Software

A arquitetura de *software* para o desenvolvimento deste sistema é constituída por dois processos.

O primeiro processo irá representar o processo de capturar imagens, ou seja, desde o *input* do utilizador até à recolha das imagens. De forma a ser possível enviar *inputs* pelo utilizador, irá ser utilizado o ROS (*Robot Operating System*) para o controle da SBC. Este *middleware* é extremamente utilizado na robótica e bastante explorado, que irá facilitar a integração deste sistema para futuramente como UAV (*Underwater Autonomous Vehicle*).

Definido as ferramentas, o *software* irá ter duas principais *drivers* em ROS: **Câmara ROS Driver** para o controlo de aquisição síncrona; **Light ROS Driver** para o controlo do sistema de iluminação, que irá disparar no momento em que a aquisição de imagens começa, para colmatar o efeito de *shutter*. De seguida, na figura 4.4 é representado um diagrama do primeiro processo.

Figura 4.4: Arquitetura de alto nível do *software* - primeiro processo

O segundo processo contém o processo de calibração do par de câmaras, como o processo de detetar, isolar e realizar a medição dos peixes juvenis nas imagens capturadas no terreno.

Antes de qualquer processamento de imagem, o sistema tem que ser calibrado para ter os parâmetros intrínsecos e extrínsecos. Este procedimento irá ser realizado nas instalações do laboratório de sistemas autónomos. Esses parâmetros irão ser utilizados para processar as imagens da esquerda e da direita do *dataset*. Além do mais, o processo de calibração terá que conter um procedimento de resolver a distorção das imagens, discutido em ?? no tópico de "Análise do modelo de imagem

subaquática", um efeito natural de imagens capturadas debaixo d'água. Na figura 4.5, é representado o processo de calibração do sistema.

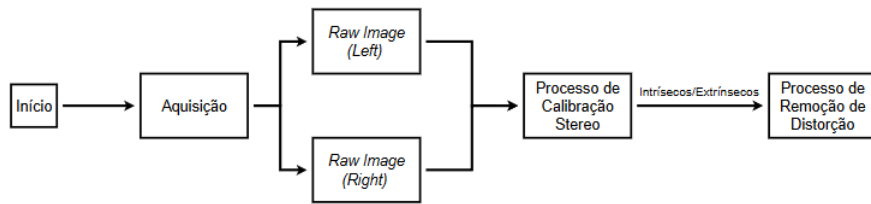


Figura 4.5: Arquitetura de alto nível do *software* - segundo processo (calibração)

Por fim, após a verificação se o processo de calibração foi bem-sucedido, é iniciada a fase de processamento de detecção e medição na qual serão utilizadas as funcionalidades da inteligência artificial, portanto, redes neurais treinadas para detectar peixes juvenis. Isto significa que será necessário um bom *dataset* para a rede ser mais "inteligente" na detecção. A imagem do alvo detectado, deverá ser segmentada de forma a melhorar os *edges*, que será necessário na próxima etapa. Com a imagem segmentada, entra na fase de medição do peixe juvenil utilizando triangulação. Conseguimos realizar essa medição, devido a ser um par de câmaras com uma base definida e com calibração. No final, deverá mostrar as imagens onde se detetou os peixes juvenis com a medição de cada um. Na figura 4.6 é demonstrado o *flow* do processo.

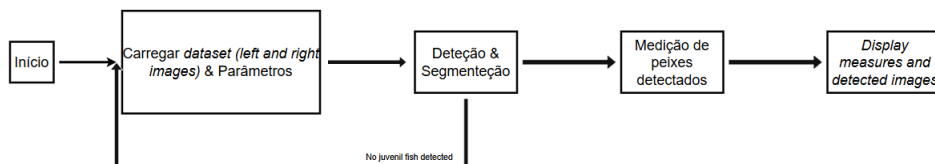


Figura 4.6: Arquitetura de alto nível do *software* - segundo processo (detecção e medição)

## 4.4 Dimensionamento

### 4.4.1 Câmaras

No que toca ao dimensionamento e à melhor escolha para as câmaras escolhidas para este projeto, é necessário realizar uma comparação de um conjunto de câmaras pré-definidas no mercado com base nas suas características que irão de encontro ao objetivo do sistema que será detectar peixes juvenis com 1-5 cm a uma distância de 1 a 2 metros. As características a observar serão: melhor resolução possível; uma taxa de frequência razoável; pelo menos 3.2 Megapíxeis; tecnologia *Global shutter*; menor *pixel size* possível.

Realizou-se um estudo de mercado, considerando os vários parâmetros discutidos anteriormente:

Tabela 4.2: Descrição das características das câmaras escolhidas

<b>Câmaras</b>	<b>Chamel.3[38]</b>	<b>TRI120S[39]</b>	<b>BFLY-31S4C[40]</b>	<b>Grassh.3[41]</b>
Megapixéis	5	12.30	3.2	5
<i>Frame Rate (fps)</i>	35	10	35	75
<i>Pixel Size (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	3.45	3.45	3.45	3.45
<i>Interface</i>	USB 3.1	GigE	GigE	USB 3.1
<i>Espectro</i>	Mono	Color	Color	Mono
<i>Consumo</i>	3.3V 150mA	3.5W	2.5W	3.3V 150mA
<i>Sensor Format</i>	2/3"	1/1"	1/1.8"	2/3"
<i>Tipo de lente</i>	C-Mount	C-Mount	C-Mount	C-Mount
<i>Resolução (px)</i>	2448×2048	4096×3000	2048×1536	2448×2048
<i>Obturador</i>	Global	Global	Global	Global
<i>Tempo de exposição (ms)</i>	0.013–31.995	0.030–1000	0.018–1190	0.006–3200
<i>Preço (EUR)</i>	931	1770	674	1741

Analisando a informação da tabela 4.2, conseguimos deduzir que têm características diferentes, tendo por exemplo a câmara BFLY-31S4C 3.2 megapíxeis e a TRI120S com 12.30 megapíxeis, sendo que todas as câmaras têm *pixelsize* e *global shutter* igual. No conjunto de características definidas anteriormente, disponibilidade de material do laboratório de sistemas autónomos e com base no custo de cada câmara. Seguiu-se assim, por escolher BFLY-31S4C como câmara para o sistema, tendo um bom *trade-off* de custo-benefício e de disponibilidade. Além do mais, irá ser realizado um estudo com a lente escolhida.

#### 4.4.2 Lentes

Nesta secção irá ser abordada a escolha das lentes para as câmaras. Com base na disponibilidade de material no laboratório de sistemas autónomos e da câmara escolhida. Decidiu-se proceder com a lente disponível e com as seguintes características que se adequam ao objetivo do projeto.

A lente referida na figura 4.7 é uma MVL4WA da THORLABS, tendo como características: 3.5 mm de *focal length*; abertura de lente f/1.4; formato do sensor 1/2'.



Figura 4.7: Lente MVL4WA[42] escolhida para o sistema

#### 4.4.3 Estudo Par Stereo do Sistema

Como referido anteriormente, sendo escolhida a câmara BFLY-31S4C com uma lente MVL4WA, é necessário, com base em alguns cálculos, perceber o comportamento da combinação do par.

Portanto, iniciando alguns parâmetros:

- Resolução(HxV): 2048x1536px;
- Tamanho do Sensor(HxV): 7.07x5.3mm;
- *Focal length*: 3.5mm;
- *Baseline*: 20cm ou 0.2m;

Para calcular o *FOV* horizontal e vertical:

$$\text{FOV}_{\text{Horizontal}}(^{\circ}) = 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{\text{Sensor Width(mm)}}{2 \cdot \text{Focal Length}} \right) \quad (4.1)$$

$$\text{FOV}_{\text{Horizontal}} = 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{7.07}{2 \cdot 3.5} \right) \quad (4.2)$$

$$\text{FOV}_{\text{Horizontal}} = 90.57^{\circ} \quad (4.3)$$

$$\text{FOV}_{\text{Vertical}}(^{\circ}) = 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{\text{Sensor Height(mm)}}{2 \cdot \text{Focal Length}} \right) \quad (4.4)$$

$$\text{FOV}_{\text{Vertical}} = 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{5.3}{2 \cdot 3.5} \right) \quad (4.5)$$

$$\text{FOV}_{\text{Vertical}} = 74.26^{\circ} \quad (4.6)$$

Calculado o *FOV* (HxV), podemos realizar cálculos de sobreposição do *FOV* para perceber a área coberta pela combinação das câmaras a uma certa distância *Z*.

$$\text{Sobreposição}_{\text{FOV, Horizontal}} = 2 \cdot Z \cdot \tan\left(\frac{\text{FOV}_H}{2}\right) - \text{baseline} \quad (4.7)$$

$$\text{Sobreposição}_{\text{FOV, Horizontal (3m)}} = 2 \cdot 3 \cdot \tan\left(\frac{90.57}{2}\right) - 0.2 \quad (4.8)$$

$$\text{Sobreposição}_{\text{FOV, Horizontal (3m)}} = 5.86 \text{ m} \quad (4.9)$$

$$\text{Sobreposição}_{\text{FOV, Vertical}} = 2 \cdot Z \cdot \tan\left(\frac{\text{FOV}_V}{2}\right) - \text{baseline} \quad (4.10)$$

$$\text{Sobreposição}_{\text{FOV, Vertical (3m)}} = 2 \cdot 3 \cdot \tan\left(\frac{74.26}{2}\right) - 0.2 \quad (4.11)$$

$$\text{Sobreposição}_{\text{FOV, Vertical (3m)}} = 4.34 \text{ m} \quad (4.12)$$

Com esses valores calculados nas equações 4.9 e 4.12, conseguimos calcular a resolução que temos por pixel/cm a uma distância de 3 metros.

$$\text{Resolução}_{\text{horizontal}_{3\text{m}}} = \frac{\text{Resolução Horizontal}}{\text{Sobreposição}_{\text{FOV, Horizontal (3m)}} \times 100} \quad (4.13)$$

$$\text{Resolução}_{\text{horizontal}_{3\text{m}}} = \frac{2448}{5.86 \times 100} = 4.18 \text{ px/cm} \quad (4.14)$$

$$\text{Resolução}_{\text{vertical}_{3\text{m}}} = \frac{\text{Resolução Vertical}}{\text{Sobreposição}_{\text{FOV, Vertical (3m)}} \times 100} \quad (4.15)$$

$$\text{Resolução}_{\text{vertical}_{3\text{m}}} = \frac{1536}{4.34 \times 100} = 3.54 \text{ px/cm} \quad (4.16)$$

Estes cálculos são consistentes mesmo para o sistema submerso devido a ser utilizado um vidro esférico chamado *dome*, que compensa a refração da água ao manter os raios de luz perpendiculares à superfície da lente (se o centro da lente estiver alinhado com o centro da esfera). Com isso, o ângulo de visão (FOV) permanece praticamente inalterado em relação ao ar.

Tabela 4.3: Tabela de comparação com o sistema dimensionado para diferentes distâncias do alvo

<b>Distância (m)</b>	<b>Sobreposição H (m)</b>	<b>Sobreposição V (m)</b>	<b>Resolução H (px/cm)</b>	<b>Resolução V (px/cm)</b>
1	1.95	1.49	12.58	10.31
3	5.86	4.34	4.18	3.54
5	9.77	7.19	2.50	2.14

Com base na tabela 4.3, foi realizada uma comparação do sistema em três distâncias. Portanto, como se pode observar, para a distância de um metro, temos uma boa resolução de píxel por centímetro. Mas a zona de captação em que ambas as câmaras têm visibilidade é pequena. Se fizermos esta análise para uma distância maior de cinco metros, podemos observar uma zona muito ampla horizontalmente e verticalmente, mas com muito pouca resolução. Que acabaria por não se conseguir identificar o que era na imagem.

A distância ideal para deteção deste conjunto seria entre 2 a 3 metros, para se conseguir ter uma boa resolução e também uma ampla visibilidade.

#### 4.4.4 Iluminação

O sistema de iluminação, selecionado para este projeto, será um controlador de iluminação LED denominado por SLS (*structured light system*). Este controlador foi desenvolvido e utilizado para projetos do LSA (Laboratório de Sistemas Autónomos). Uma das razões essenciais para o uso deste controlador será para o disparo da câmara e a sua versatilidade para o controlo dos LEDs. O SLS tem uma unidade de processamento que é comunicada através do protocolo RS-485.

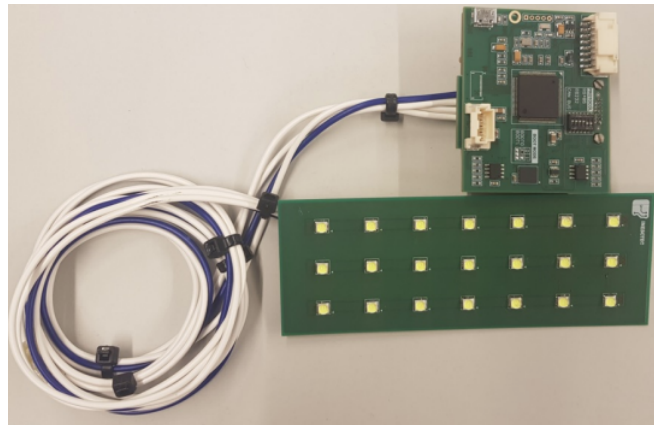


Figura 4.8: Sistema de SLS utilizado no LSA

#### 4.4.5 Estrutura Mecânica

Relativamente à estrutura mecânica, conforme discutido neste capítulo, seguiu-se com o intuito de validar o sistema num cenário manual, em que o sistema capta imagens com o utilizador a começar a captura do mesmo. De forma a ser resistente e de fácil montagem, decidiu-se optar pela construção de uma estrutura em perfil de alumínio com o objetivo de colocar uma distância de *baseline* entre as câmaras de 20cm. Além do mais, terá que ter suporte para a iluminação. De seguida, na figura 4.9 podemos observar um conceito ilustrado como ficaria a montagem e a parte mecânica.

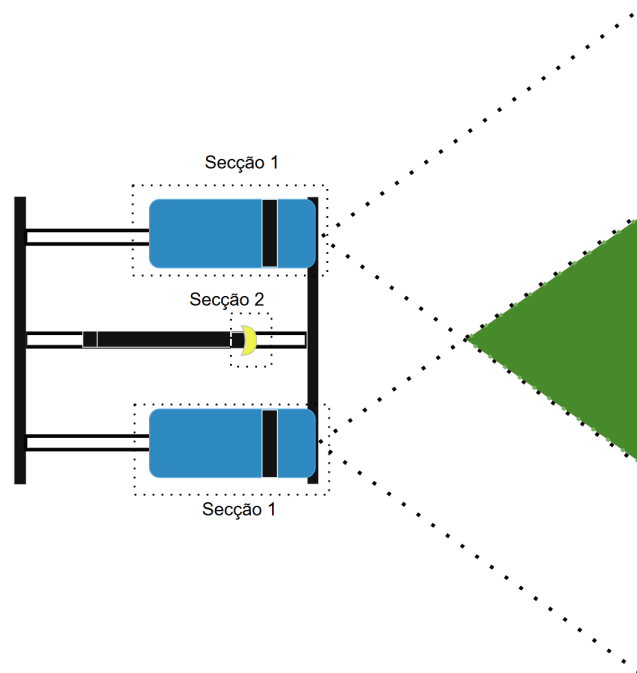


Figura 4.9: Esquema conceitual da estrutura mecânica e os componentes

Portanto, na secção 1 serão as câmaras, esquerda e direita. E na secção 2 a iluminação. De forma a não prejudicar a imagem, seria instalada acima da linha horizontal das câmaras.

Visto que não terá que suportar grandes pressões, dado que o objetivo de adquirir imagens será de 1 ou 2 metros de profundidade, então não será necessário fazer um estudo de pressão.



## Capítulo 5

# Implementação e Resultados

### 5.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os detalhes de implementação e a metodologia seguida em cada etapa do projeto. Este encontra-se dividido em cinco secções: em 5.2 é apresentada a solução da estrutura mecânica, na qual serão apresentados os modelos e peças utilizadas; em 5.3 é apresentado o *hardware* utilizado para a alimentação das câmaras e iluminação, bem como o *PWM* (*Pulse Width Modulation* e Ligações; em 5.4 é apresentado o *software* desenvolvido. Como disse na proposta de solução, irá ser composto por duas partes, a primeira o controlo por ROS e a segunda o algoritmo e processamento de imagens; por último, em 5.5 serão apresentados os resultados experimentais, ou seja, como foi composta a calibração do nosso sistema, testes desenvolvidos para validação e testes no terreno.

### 5.2 Estrutura Mecânica

Considerando os requisitos discutidos do capítulo 4.4.5, foi desenhado um modelo 3D e as peças necessárias de suporte através do uso de *software* CAD (do inglês *Computer-aided Design*), mais especificamente o *software* Fusion 360. Esta secção será dividida em três partes: a primeira parte será a estrutura principal que irá sustentar as câmaras e a iluminação; de seguida, o modelo da estrutura cilíndrica das câmaras; por fim, serão os suportes necessários para a estrutura.

Na figura 5.1, encontra-se o modelo 3D da montagem da estrutura, cilindros das câmaras e suportes. No Apêndice A é ilustrado nos desenhos referentes A.7.

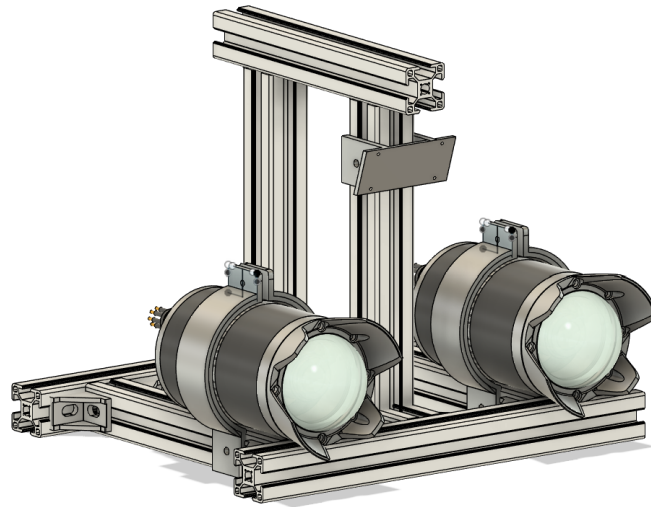


Figura 5.1: Modelo 3D do Sistema Completo com as câmaras, estrutura e suportes

### 5.2.1 Estrutura de Perfil

Na Figura 5.2 é possível observar o modelo 3D das peças de perfil de alumínio, de forma a formar a estrutura onde vai suportar a estrutura dos cilindros das câmaras, suportes e a iluminação. No Apêndice A é apresentado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes, nos desenhos referentes A.1 e A.2.

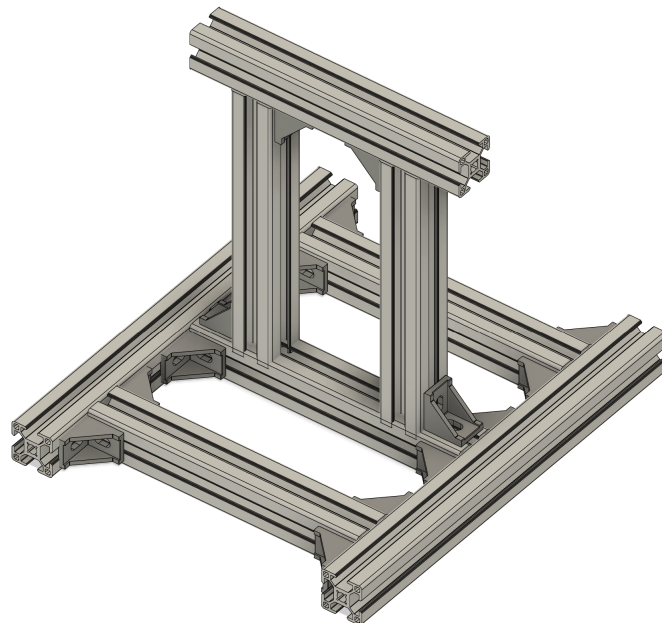
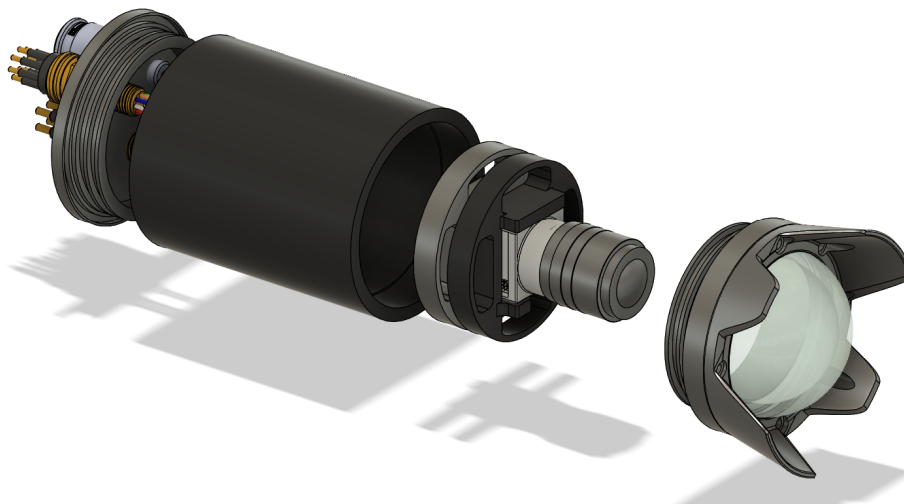


Figura 5.2: Modelo 3D da Estrutura de Perfil em Alumínio

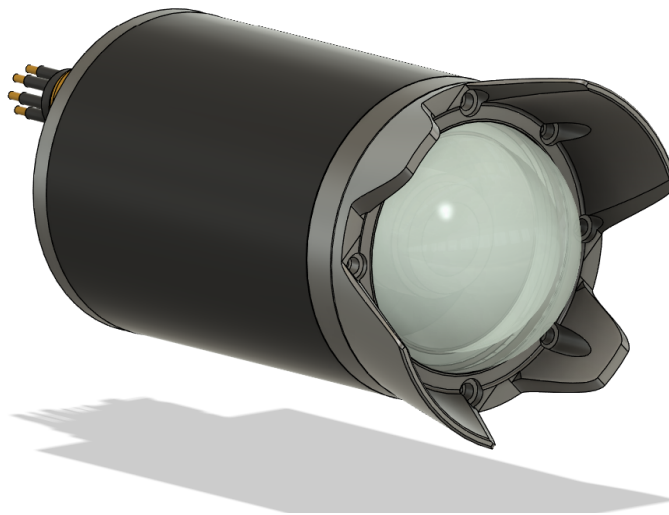
Esta estrutura da figura 5.2 é de montagem rápida, que faz dela a escolha ideal para projetos para validação.

### 5.2.2 Estrutura Cilíndrica das Câmaras

Na Figura 5.3 é possível observar o modelo 3D da estrutura que vai suportar a câmara, *dome* e as ligações. No Apêndice A é apresentado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes, nos desenhos referentes A.3.



(a) Modelo 3D da Estrutura da Câmara (vista 1)



(b) Modelo 3D da Estrutura da Câmara (vista 2)

Figura 5.3: Modelos 3D da Estrutura da Câmara em duas vistas.

Esta estrutura referente à figura 5.3 contém diferentes partes, como a tampa inferior que contém as ligações para o exterior, cilindro, tampa superior que fecha o cilindro, e a proteção da dome que também tem a função de, ao apertar os parafusos

em volta, forçar a dome para dentro que, com um *o-ring* reto, veda a água e previne deixar de perder vácuo. Nas próximas secções serão apresentados esses componentes.

### Tampa inferior

Na Figura 5.4 é possível observar o modelo 3D da tampa inferior que contém os três componentes que servem de ligação com a câmara e a válvula para retirada o ar. No Apêndice A é apresentado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes, nos desenhos referentes A.4.

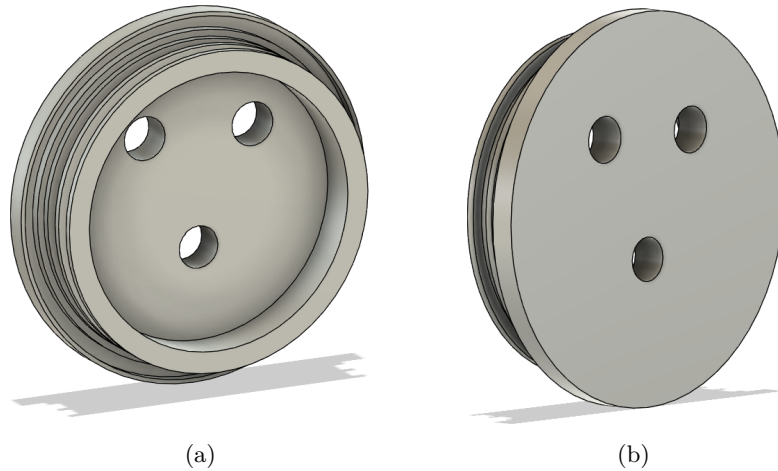


Figura 5.4: a) Modelo 3D da Tampa Inferior (vista 1); b) Modelo 3D da Tampa Inferior (vista 2)

### Cilindro

Na Figura 5.5 é possível observar o modelo 3D do Cilindro. No Apêndice A é apresentado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes, nos desenhos referentes A.5.

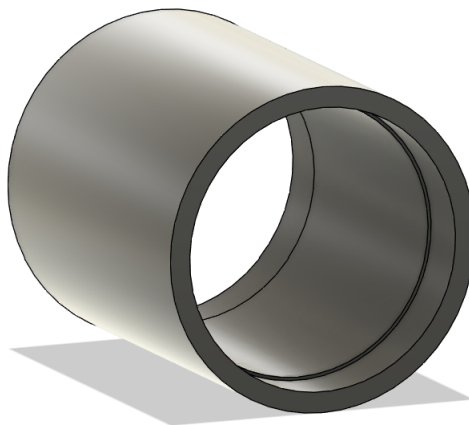


Figura 5.5: Modelo 3D do Cilindro

### Tampa Superior

Na Figura 5.6 é possível observar o modelo 3D da tampa superior. No Apêndice A é apresentado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes, nos desenhos referentes A.6.

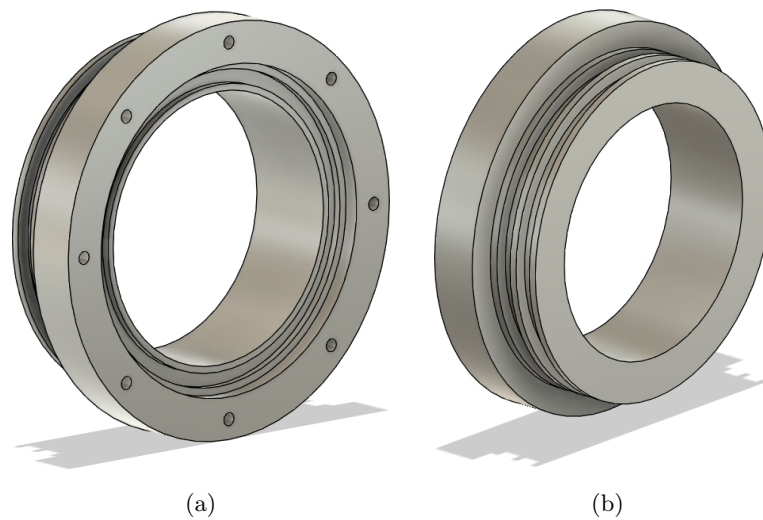


Figura 5.6: a) Modelo 3D da Tampa Superior (vista 1); b) Modelo 3D da Tampa Superior (vista 2)

### Proteção da *Dome*

Na Figura 5.7 é possível observar o modelo 3D da tampa superior. No Apêndice A é apresentado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes, nos desenhos referentes A.8.

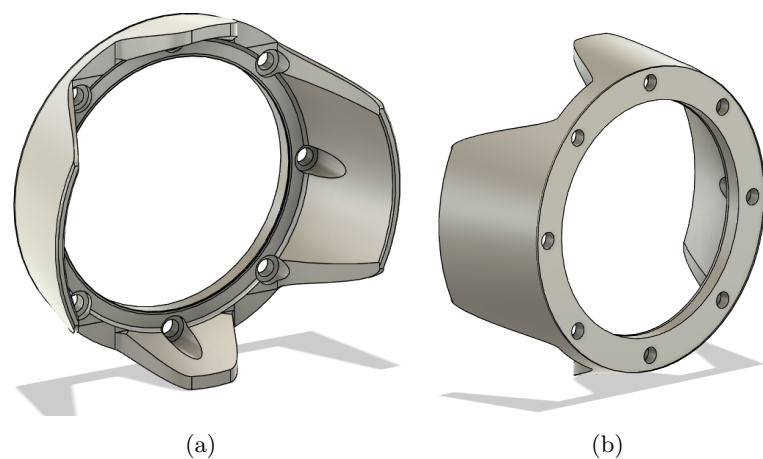


Figura 5.7: a) Modelo 3D da Tampa Superior (vista 1); b) Modelo 3D da Tampa Superior (vista 2)

### 5.2.3 Suportes

#### Suporte de Iluminação

Na Figura 5.8 é possível observar o modelo 3D do suporte de iluminação. No Apêndice A é apresentado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes, nos desenhos referentes A.9.

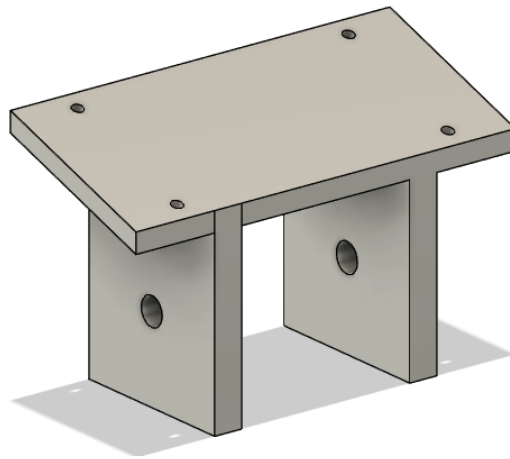


Figura 5.8: Modelo 3D do Cilindro.

#### Suporte do Cilindro

Na Figura 5.9 é possível observar o modelo 3D do suporte do cilindro. Este serve para segurar os cilindros na posição correta. No Apêndice A é apresentado o desenho de cada peça com as medidas mais relevantes, nos desenhos referentes A.10.

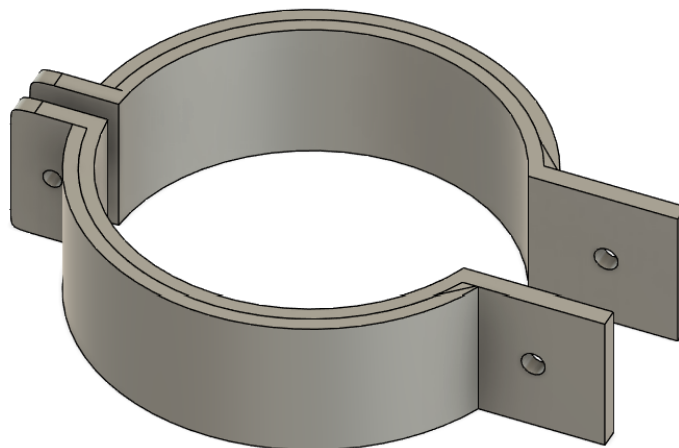


Figura 5.9: Modelo 3D do Cilindro

### 5.3 Hardware

Nesta secção irá ser demonstrado o *hardware* utilizado, mais especificamente à parte de eletrónica. Este projeto, como discutido nos cenários de operação, irá ser uma validação do sistema, com foco à captura de peixes juvenis, criar um *dataset* e um processo de deteção e medição dos mesmos para estudos posteriores. Portanto, foi utilizado *hardware* do laboratório de sistemas autónomos como se pode observar na figura 5.10, que será reutilizado para os fins do mesmo. No processo da montagem, foi necessário montar novos cabos para ligações, reparações e aplicação da placa de SLS na caixa. Neste projeto, não foi necessário desenvolver ou dimensionar novas placas de eletrónica.

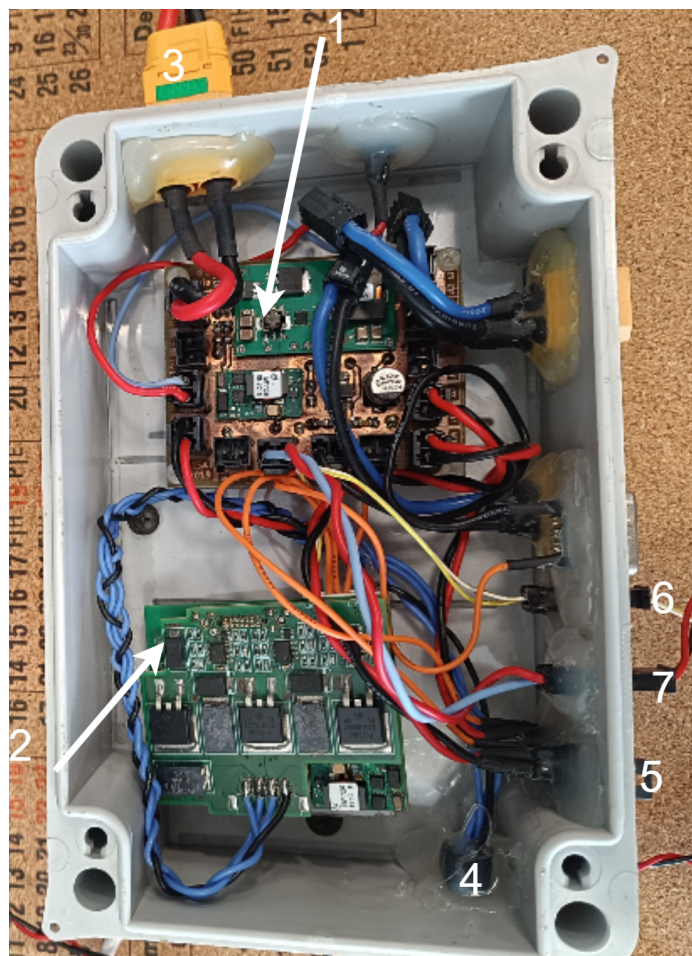


Figura 5.10: *Hardware box* para controlo e alimentação do sistema

Conforme na figura 5.10, portanto: 1) SBC que é a placa principal; 2) SLS para *hardware trigger* de sincronização para as câmaras e o sistema de iluminação; 3) Alimentação 24V; 4) Ligação ao sistema de iluminação; 5) Dois GPIO's de ligação às câmaras; 6) Ligação UART para comunicação com o PC; 7) Alimentação 5V.

## 5.4 Software

Ao longo desta secção é detalhado o software desenvolvido para a placa de SBC, seguindo a arquitetura de alto nível proposta na secção 4.3.2. de *software*. Na figura 5.11, segue-se a arquitetura de *software* utilizada no projeto.

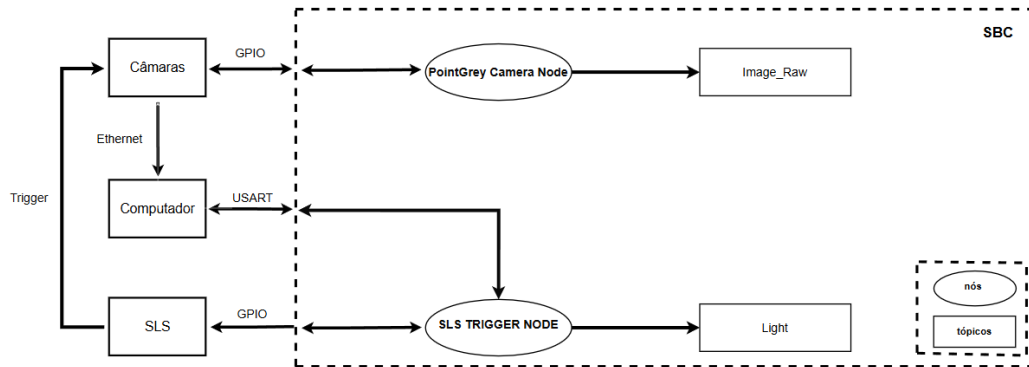


Figura 5.11: Arquitetura de *software* detalhada

No que diz respeito ao *software* desenvolvido para a SBC, como representado na figura 5.11, são utilizados dois nós de ROS: *Pointgrey Camera Node* que tem um conjunto de nós para o controlo e aquisição de imagens, que comunica com as câmaras através de protocolo *Ethernet*; para o controlo do sistema de iluminação temos o *SLS TRIGGER NODE* que é controlado por ligação GPIO.

### 5.4.1 SBC

Quanto ao *software* desenvolvido para a SBC, os nós responsáveis pelo controlo e aquisição de imagens do *package PointGrey Camera Driver*, utilizam vários nós e um serviço chamado *nodolet* para gerir a mesma. Vários parâmetros são definidos como base, como se pode observar na figura 5.12.

```
started roslaunch server http://dlogo-IdeaPad-3-15ALC6:35643/
SUMMARY
=====
PARAMETERS
* /camera/left/camera_nodelet/frame_id: camera_left
* /camera/left/camera_nodelet/frame_rate: 20
* /camera/left/camera_nodelet/serial: 16079245
* /camera/right/camera_nodelet/frame_id: camera_right
* /camera/right/camera_nodelet/frame_rate: 20
* /camera/right/camera_nodelet/serial: 16049097
* /camera/stereo_image_proc/approximate_sync: True
* /roscdistro: noetic
* /rosversion: 1.17.4

NODES
/camera/
stereo_image_proc (stereo_image_proc/stereo_image_proc)
/camera/left/
camera_nodelet (nodelet/nodelet)
camera_nodelet_manager (nodelet/nodelet)
image_proc_debayer (nodelet/nodelet)
/camera/right/
camera_nodelet (nodelet/nodelet)
camera_nodelet_manager (nodelet/nodelet)
image_proc_debayer (nodelet/nodelet)
```

Figura 5.12: Representação dos nós utilizados pelo *Package* da Point-Grey

Na figura 5.13, são os tópicos publicados pelos nós.

```

dlogo@dlogo-IdeaPad-3-15ALC6:~/catkin_ws$ rostopic list
/camera/disparity
/camera/left/camera_info
/camera/left/camera_nodelet/parameter_descriptions
/camera/left/camera_nodelet/parameter_updates
/camera/left/camera_nodelet_manager/bond
/camera/left/image
/camera/left/image_color
/camera/left/image_mono
/camera/left/image_proc_debayer/parameter_descriptions
/camera/left/image_proc_debayer/parameter_updates
/camera/left/image_raw
/camera/left/image_rect
/camera/left/image_rect_color
/camera/pointsz
/camera/right/camera_info
/camera/right/camera_nodelet/parameter_descriptions
/camera/right/camera_nodelet/parameter_updates
/camera/right/camera_nodelet_manager/bond
/camera/right/image
/camera/right/image_color
/camera/right/image_mono
/camera/right/image_proc_debayer/parameter_descriptions
/camera/right/image_proc_debayer/parameter_updates
/camera/right/image_raw
/camera/right/image_rect
/camera/right/image_rect_color
/camera/stereo_image_proc/parameter_descriptions
/camera/stereo_image_proc/parameter_updates
/camera/stereo_image_proc_debayer_left/parameter_descriptions
/camera/stereo_image_proc_debayer_left/parameter_updates
/camera/stereo_image_proc_debayer_right/parameter_descriptions
/camera/stereo_image_proc_debayer_right/parameter_updates
/camera/stereo_image_proc_rectify_color_left/parameter_descriptions
/camera/stereo_image_proc_rectify_color_left/parameter_updates
/camera/stereo_image_proc_rectify_color_right/parameter_descriptions
/camera/stereo_image_proc_rectify_color_right/parameter_updates
/camera/stereo_image_proc_rectify_mono_left/parameter_descriptions
/camera/stereo_image_proc_rectify_mono_left/parameter_updates
/camera/stereo_image_proc_rectify_mono_right/parameter_descriptions
/camera/stereo_image_proc_rectify_mono_right/parameter_updates
/diagnostics
/rosout
/rosout_agg

```

Figura 5.13: Representação dos tópicos utilizados pelo *Package* da PointGrey

Após ativação do *trigger* pelo SLS, é dado início à aquisição de imagens, publicando as mesmas nos tópicos como na figura 5.13. Neste projeto os tópicos de interesse serão *image\_raw* da câmara esquerda e direita, gravando através do rosbag.

Por fim, o nó responsável pelo controlo da iluminação, *SLS TRIGGER NODE* em que utiliza uma mensagem personalizada para alterar parâmetros.

- `sls_dev` : Define o controlador USB a utilizar.
- `sls_fps` : Define a taxa de disparo dos LEDS, bem como a aquisição das imagens. Pode ser escolhido entre 1, 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 15, 20, 25, 30.
- `sls_id` : Define o id do sistema da iluminação.

Na figura 5.14, é possível observar a inicialização do nó, com os parâmetros base.

```

dlogo@dlogo-IdeaPad-3-15ALC6:~/catkin_ws$ roslaunch sls_trigger sls_launch.launch
... logging to /home/dlogo/.ros/log/d6ab8e9c-704a-11f0-92dd-358bcfd647e/roslaunch-dlogo-IdeaPad-3-15ALC6-4980.log
Checking log directory for disk usage. This may take a while.
Press Ctrl-C to interrupt
Done checking log file disk usage. Usage is <1GB.

started roslaunch server http://dlogo-IdeaPad-3-15ALC6:33449/

SUMMARY
=====
PARAMETERS
* /rostdistro: noetic
* /rosversion: 1.17.4
* /sls/sls_dev: ttyUSB0
* /sls/sls_fps: 6
* /sls/sls_id: 0

NODES
/sls/
sls_trigger_node (sls_trigger/slsnode)

```

Figura 5.14: Representação do nó utilizado pelo SLS

### 5.4.2 *Software* auxiliar

Esta secção foi criada de forma a auxiliar e demonstrar os algoritmos utilizados ao longo do projeto. Irá ser apresentado o intuito do algoritmo por breves palavras e com um fluxograma de forma a ser perceptível. Em referência nos Anexos, é apresentado o código completo.

#### **Algoritmo para Retificação do *Dataset***

Na figura 5.15, é demonstrado um fluxograma do comportamento do algoritmo para carregar os parâmetros da calibração, ler as imagens e por fim retificar todo o *dataset*. No anexo B.1 é apresentado todo o código utilizado em MATLAB.

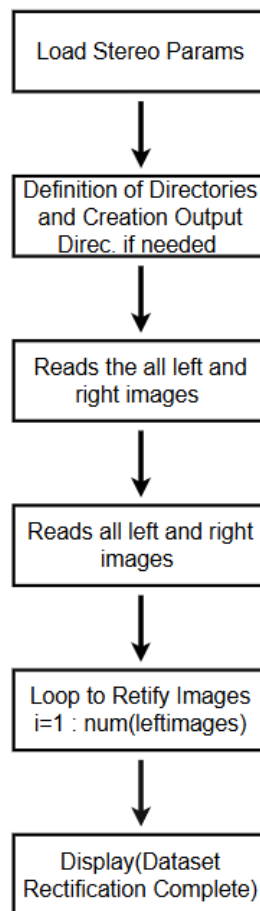


Figura 5.15: Ilustração das etapas do algoritmo para retificação do *dataset*

#### **Algoritmo de Extração de Parâmetros da Calibração**

Na figura 5.16, é demonstrado um fluxograma do comportamento do algoritmo para obter os parâmetros da calibração para um ficheiro *.mat* ou *.yaml*, a meio do processo foi necessário calcular as matrizes *R1*, *R2* e *Q* que irão servir para retificar e fazer triangulação mais tarde. Os parâmetros são guardados num ficheiro *.mat*

para MATLAB e .yaml para OPENCV. No anexo B.2 é apresentado todo o código utilizado em MATLAB.

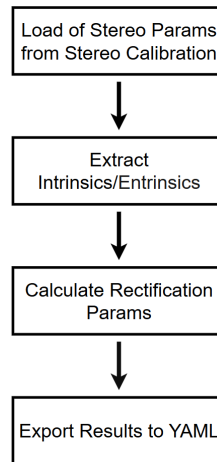


Figura 5.16: Ilustração das etapas do algoritmo para obter os parâmetros da calibração

### Algoritmo de Validação para Medição de Objetos

Na figura 5.17, é demonstrado o fluxograma do comportamento do algoritmo para realizar a validação da calibração e retificação com a medição de objetos conhecidos, ou seja, tendo imagens de teste com objetos medidos à partida, conseguimos verificar se o sistema é preciso e as margens de erro. Esses testes irão encontrar-se na secção dos Resultados Experimentais. No anexo B.3 é apresentado todo o código utilizado em Python, utilizando ferramentas como o OPENCV.

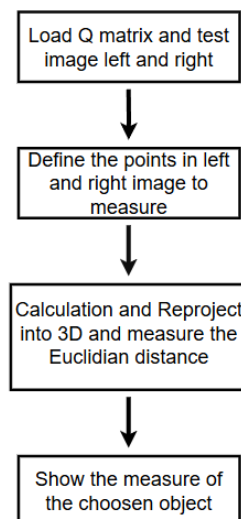


Figura 5.17: Ilustração das etapas do algoritmo para testar medidas conhecidas para validação do sistema

### Algoritmo de Detecção e Validação de Medição Automática

Na figura 5.18, é demonstrado o fluxograma do comportamento do algoritmo para validar a detecção realizada pelo modelo treinado YOLO na secção ??, realizar o *match* das deteções feitas entre a imagem esquerda e direita, e automaticamente detetar os peixes juvenis. De forma a validar esta medição automática, irá ser realizada em paralelo uma medição manual de pontos 2D em cada par de imagens e, por fim, demonstrar os resultados obtidos, bem como a estatística da população. No anexo B.4, é apresentado todo o código utilizado em Python, utilizando ferramentas como o OPENCV e outros.

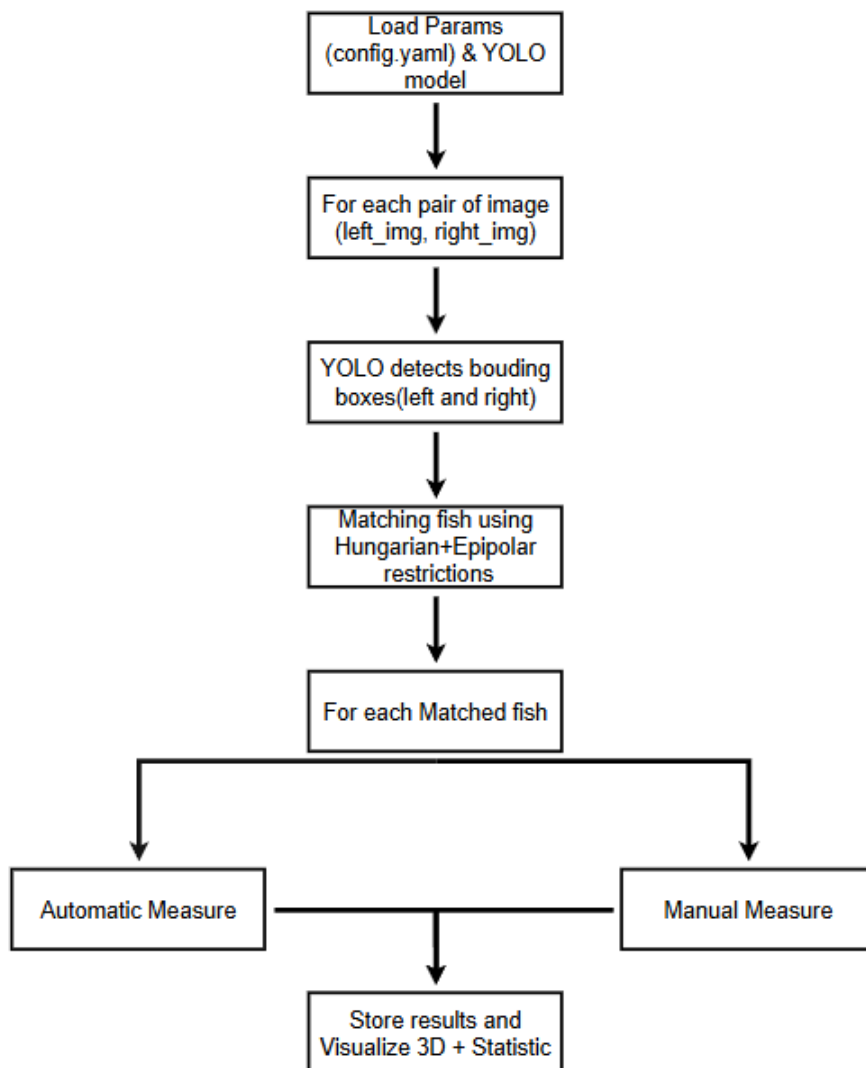


Figura 5.18: Ilustração das etapas do algoritmo para detetar e medir automaticamente peixes juvenis

## 5.5 Resultados Experimentais

### 5.5.1 Calibração e Retificação do Sistema Estéreo

Como as duas lentes da câmara do sistema real apresentam distorções, os planos de imagem das câmaras esquerda e direita não podem estar exatamente no mesmo plano que o modelo ideal, sendo, portanto, necessário calibrar a câmara. Os parâmetros internos e externos de uma câmara são determinados pela relação entre as coordenadas tridimensionais de um ponto no espaço e seus pontos correspondentes na imagem. Por meio da retificação estereo, o sistema real de visão estereo binocular é transformado em um sistema estereo binocular ideal, permitindo assim a obtenção do valor de profundidade.

Existem três métodos de calibração da câmara: calibração manual, MATLAB *calibration toolbox*, e auto-calibração com a utilização do OpenCV.

O método escolhido para a calibração do par estereo será por MATLAB *calibration toolbox* sendo prático, simples e rápido. E tem uma particularidade comparado com o OpenCV, em que, posteriormente, nas imagens retificadas, o OpenCV tende a remover partes das imagens laterais ao utilizar as funções de *undistort*. Em que o MATLAB *calibration toolbox* mantém praticamente a resolução da imagem original.

Portanto, neste método foi utilizada uma *chessboard*, como se pode observar na figura 5.19 que contém 6x4 *inner corners* com uma altura por quadrado de 6mm, estes parâmetros irão ser utilizados como *input*.

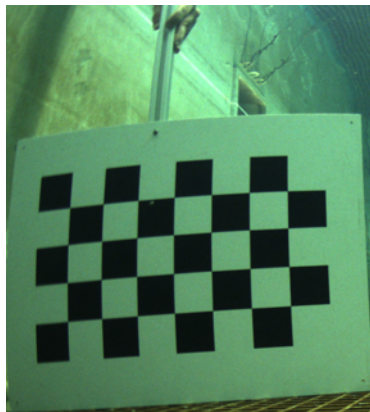


Figura 5.19: *Chessboard* utilizada para a calibração

No Laboratório de Sistemas Autônomos, para efeitos de calibração e testes, foi utilizado um tanque de água com grandes dimensões para validação em laboratório antes de ir para um cenário real.

Foi verificado se os cilindros estavam em vácuo e se estava tudo funcional, como se pode verificar na figura 5.20.

De seguida, foi colocado o sistema no tanque em cima de uma grelha, como se pode observar na figura 5.21, para preparar para capturar imagens para um *dataset*

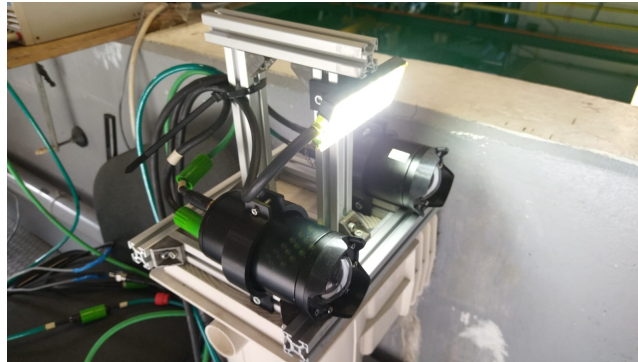


Figura 5.20: Verificação do Sistema fora de água

específico com 20 pares de imagens em média para calibração. Estas imagens contêm várias posições da *chessboard*, de preferência 3 por canto e centro, por exemplo: de frente, inclinado para a frente e para trás.

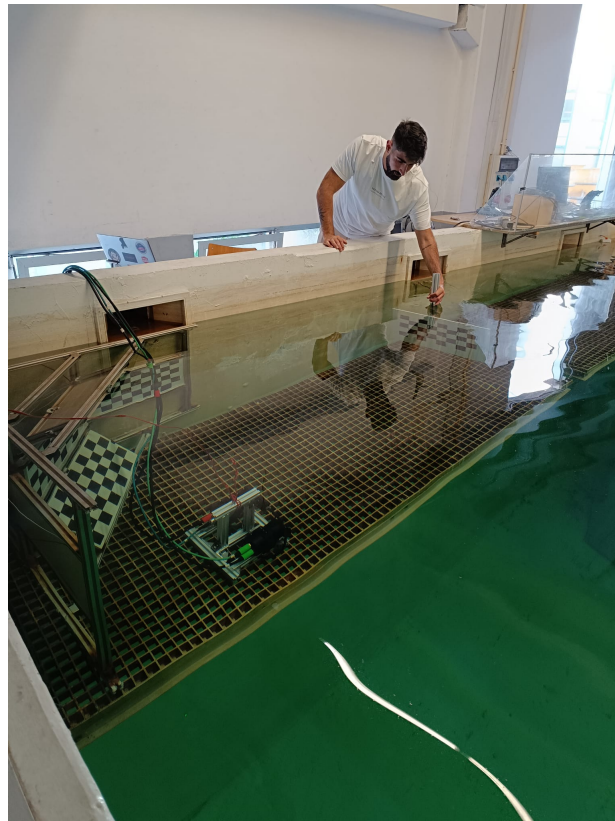


Figura 5.21: Sistema colocado dentro do tanque de água

Houve algumas limitações no que toca a capturar imagens da *chessboard* nos extremos do lado do tanque, em que não tinha como ter margem para chegar a esse lado. Mas com os resultados obtidos, é possível afirmar que o sistema está calibrado e apresenta dados promissores para ser um sistema preciso.

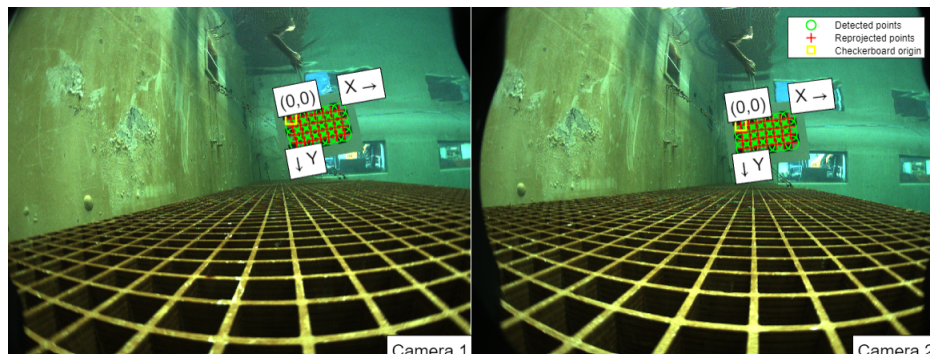


Figura 5.22: Exemplo de detecção dos pontos na *chessboard* pela *toolbox* do MATLAB

Na figura 5.22, encontra-se um exemplo de detecção dos pontos em que irá ser utilizado na extração dos intrínsecos e extrínsecos.

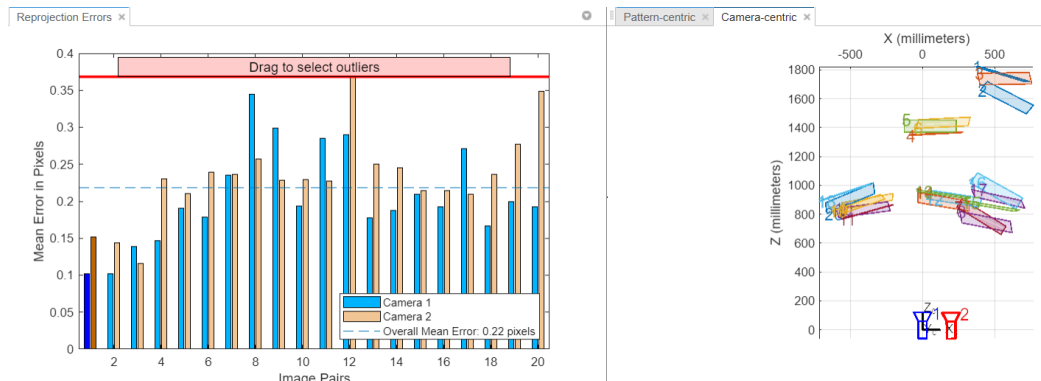


Figura 5.23: Dados da calibração do sistema pelo MATLAB *calibration toolbox*

Na figura 5.23, do lado esquerdo, encontra-se um gráfico de barras em que tem como dado o *mean error* da reprojeção da distância entre os pontos detetados e os pontos reprojitados. dos pixels por par de imagens. A média desse erro foi de 0.22 pixels, o que é um resultado excelente para um sistema calibrado. O valor a seguir para perceber se é uma boa calibração ou não, terá que ser menor que 1. No lado direito da figura 5.23, são demonstradas as posições tridimensionais das câmaras e dos *chessboards* no referencial das câmaras.

Tendo o sistema calibrado, podemos passar para a parte de retificação do par estéreo.

Os parâmetros intrínsecos e extrínsecos que foram populados com a calibração pelo MATLAB *calibration toolbox* são colocados num ficheiro *.mat*, para serem utilizados para retificação do *dataset* dos peixes juvenis por outro *script*. Alguns cálculos serão feitos por um *script* em MATLAB para obter as matrizes que irão ser utilizadas na retificação para retirar a distorção causada pela água e a *dome*. Este procedimento foi realizado devido à versão do MATLAB não disponibilizar as funções que

obtem automaticamente as matrizes  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  e o  $Q$ .

Na figura 5.24, é demonstrado o par de imagem, esquerda e direita antes da retificação. A distorção de imagem é bastante perceptível, e não existe alinhamento da geometria epipolar, visto a olho nu.

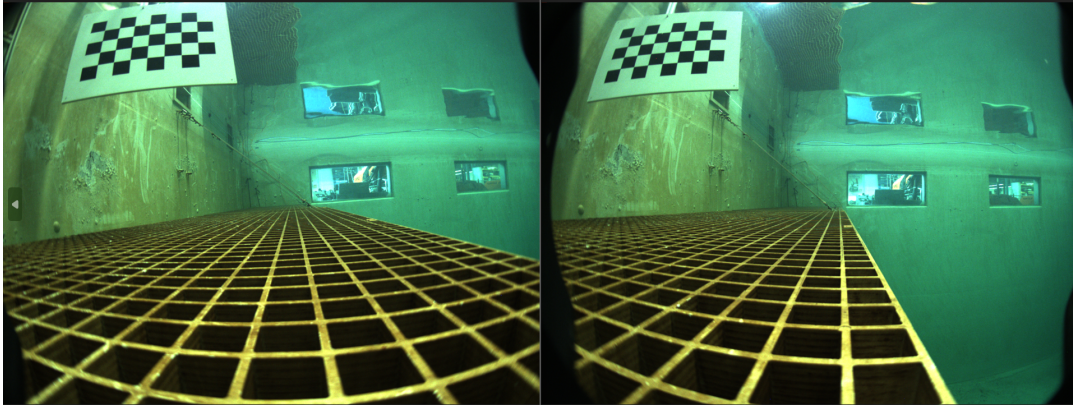


Figura 5.24: Imagens não retificadas da esquerda e da direita

De seguida, temos na figura 5.25 o par de imagem retificado, ou seja, a distorção da imagem é retificada e é possível validar observando se a linha da geometria epipolar encontra-se nos mesmos pontos da imagem da esquerda para a direita.

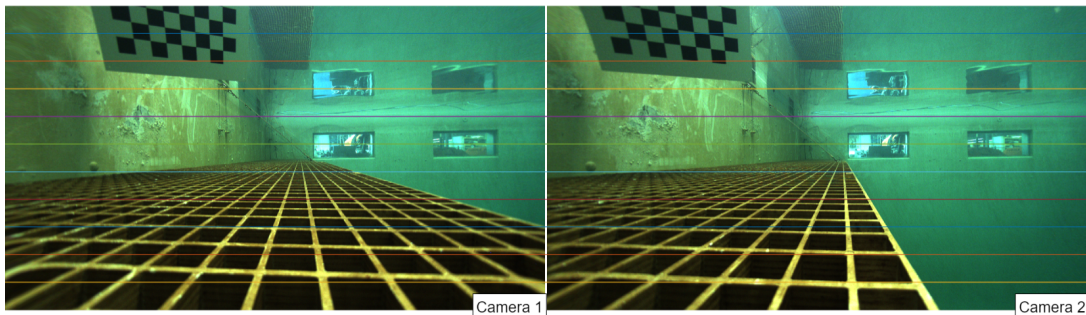


Figura 5.25: Imagens retificadas da esquerda e da direita, com a reta da geometria epipolar

### 5.5.2 Testes Laboratoriais

De forma a validar a calibração e a precisão do sistema, optou-se por testar algumas amostragens de imagens estéreo com objetos de medidas conhecidas, sabendo à partida quanto o objeto mede, tentamos obter a mesma medida através de triangulação de pontos. Foi utilizado o algoritmo de validação para Medição de Objetos em OPENCV disponível em [??](#). Os pontos são fornecidos pelo utilizador com *clicks*, dois pontos em cada imagem, na esquerda e na direita do par estéreo. Por fim, realizará a triangulação que nos fornecerá a medida escolhida.

Foram realizadas três experiências:

- Com um bloco retangular de madeira com uma medida de comprimento 499 milímetros.

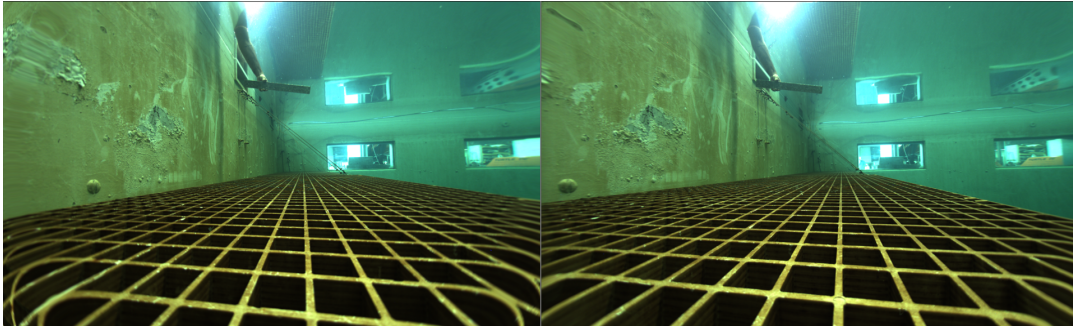


Figura 5.26: Imagens retificadas da esquerda e da direita, do objeto bloco retangular

- Uma caneta com um comprimento de 137 milímetros.

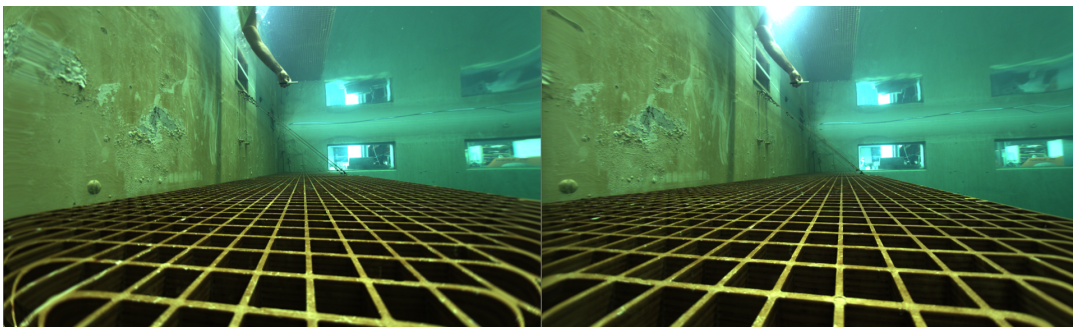


Figura 5.27: Imagens retificadas da esquerda e da direita, duma caneta

- Um parafuso com comprimento de 30 milímetros.

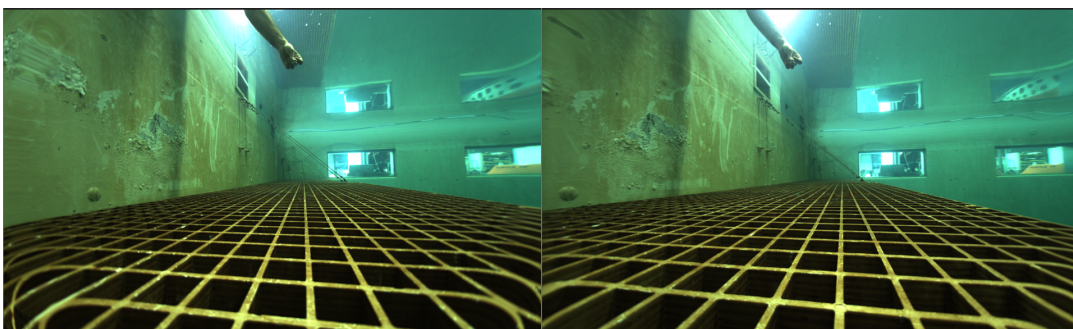


Figura 5.28: Imagens retificadas da esquerda e da direita, de um parafuso

Os objetos e as medições foram realizados no mesmo local em que foi realizado o processo de calibração no laboratório de sistemas autónomos. De seguida, irão ser ilustrados na tabela 5.1 os resultados das medições das figuras 5.26, 5.27 e 5.28 a

uma distância de mais ou menos 1,5 metros. A medida utilizada é milímetros para a tabela 5.1.

Tabela 5.1: Registo dos resultados das medições e desvio-padrão

Objeto	Comprim.	1º Med.	2º Med.	3 ºMed.	Desv.-Padrão
Bloco Retang.	499	501	498.73	498.88	1.354
Caneta	137	136.1	136.51	137.7	0.679
Parafuso	30	30.20	31.18	30.27	0.446

Ao observar a tabela 5.1, podemos tirar algumas ilações relativamente ao erro associado do medido no mundo real por mim, Diogo Barbosa e as medidas que o sistema estéreo obteve a partir da triangulação.

Portanto no Bloco Retangular, ao realizar-se o cálculo do Erro Relativo, obteve-se um mínimo de 0.05% e um máximo 0.40% de erro relativo. No objeto caneta, resultou de um mínimo de 0.35% e máximo 0.65%. E por fim no parafuso com um comprimento reduzido, o resultado foi um mínimo de 0.66% e um máximo de 3.93%.

Com estes resultados, e com o objetivo de detetar e medir peixes juvenis que contêm comprimentos compreendidos entre 3 a 5 cm em adultos, podemos afirmar que com os resultados do teste laboratorial, podemos obter erros relativos com um máximo de 3.93% sobre a medida correta do peixe juvenil. Estes testes serviram o propósito de caracterizar a precisão do sistema, uma vez caracterizado o próximo passo será testes em cenário real.

### 5.5.3 Treino do modelo *Deep Learning*

Nesta secção, irá ser demonstrado e avaliado os resultados do treino do modelo para detetar peixes juvenis, esta parte serve no intuito de automatizar e avaliar com o *dataset* recolhido, a realização de medições dos peixes detetados.

Foram realizadas duas tentativas de proceder com as anotações do *dataset* e treinar o modelo.

#### **Roboflow**

O Roboflow é uma plataforma de visão computacional que facilita todo o processo de trabalhar com imagens e vídeos para treinar modelos de detecção, segmentação e classificação.

Numa primeira tentativa, foi criado um projeto com o intuito de treinar com modelo do tipo *Keypoint Detecting (Fast)*, este serviria para detetar o peixe juvenil e definir os pontos da cauda e da cabeça com o treino e anotação especificamente definido para o caso. Este serviria para realizar a medição dos pontos com triangulação.

Com isto, foi estabelecido um *dataset* com 220 imagens, com vários cenários e imagens de peixes juvenis. Isto irá validar se o modelo serve para o objetivo

pretendido. Na figura 5.29, é ilustrado o resultado do treino com o modelo *YOLOv11 Keypoint Detection (Fast)*.

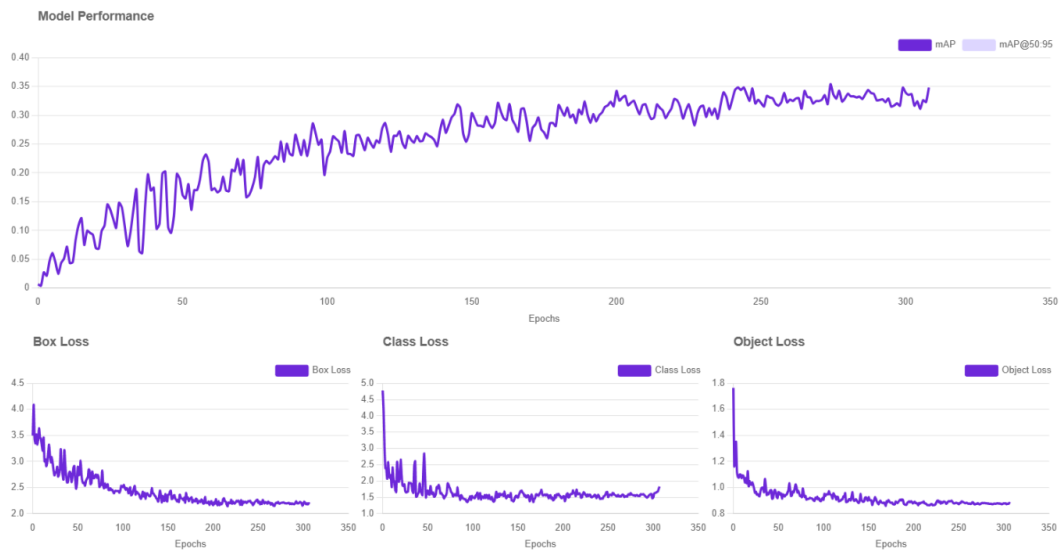


Figura 5.29: Gráficos de avaliação do modelo treinado no Roboflow

O resultado do treino, com métricas de mAP@50 de 35%, precisão 50.8% e 32.5% de *Recall* serviu para perceber que era necessário um *dataset* mais abrangente e com treino mais intenso, ou seja, mais *Epochs* e um modelo que não fosse *Fast*. Apesar de as métricas não estarem muito boas, este modelo treinado serviu para perceber que os pontos da cauda e cabeça nos peixes que estavam a ser detetados não estão a ser bem posicionados. Isto iria fornecer más posições no cálculo do comprimento.

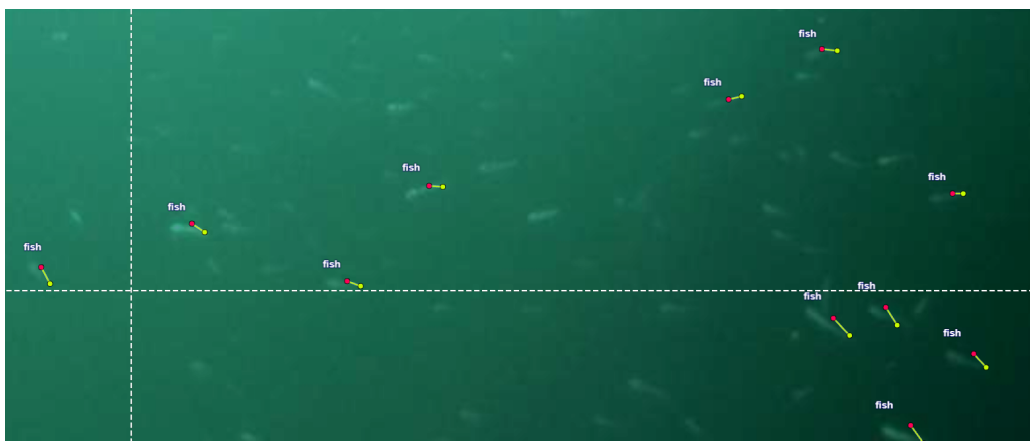


Figura 5.30: Imagem de teste do modelo treinado com *Keypoint Detection*

Com esta figura 5.30 e relativamente ao processo, determinou-se que o *Keypoint Detection* não é o melhor caminho a seguir, devido aos peixes juvenis serem tão pequenos o que se torna difícil para o modelo determinar os pontos corretos.

Relativamente ao Roboflow, visto ser limitado em questões de que modelo e disponibilidade para treinar é limitada. Seguiu-se com a solução na seguinte secção.

### Ultralytics Yolo & Label Studio

Comparativamente ao *Roboflow*, que contém uma infraestrutura que permite realizar anotações e treinar o modelo *online*. Sendo o intuito treinar o modelo localmente, que permite ter o controlo total, foi criado um ambiente no Anaconda, em que se vai utilizar o YOLO uma *library* do Ultralytics e o Label Studio para realizar as anotações de modo *offline* ou localmente na máquina.

Primeiramente, dado que com *Keypoint model* não tem precisão suficiente no que toca a colocar os pontos necessários para determinar o comprimento do peixe, então irá ser utilizada segmentação como técnica modelo para este projeto, segmentação fornece *bounding box* e o alvo segmentado, ideal para estes pequenos peixes juvenis.

Foi composto um *dataset* de teste, com 100 imagens com anotações de imagens recolhidas em Barragem dos Pisões e na Marina de Leça, isto irá servir como objetivo de teste para determinar a viabilidade com segmentação, se o modelo consegue detetar e definir parâmetros concretos de *bouding box* com peixes juvenis na qual são de pequena dimensão. Na figura 5.31, é ilustrado o resultado do treino com o modelo *YOLOv11 Segmentation (Large)* [43].

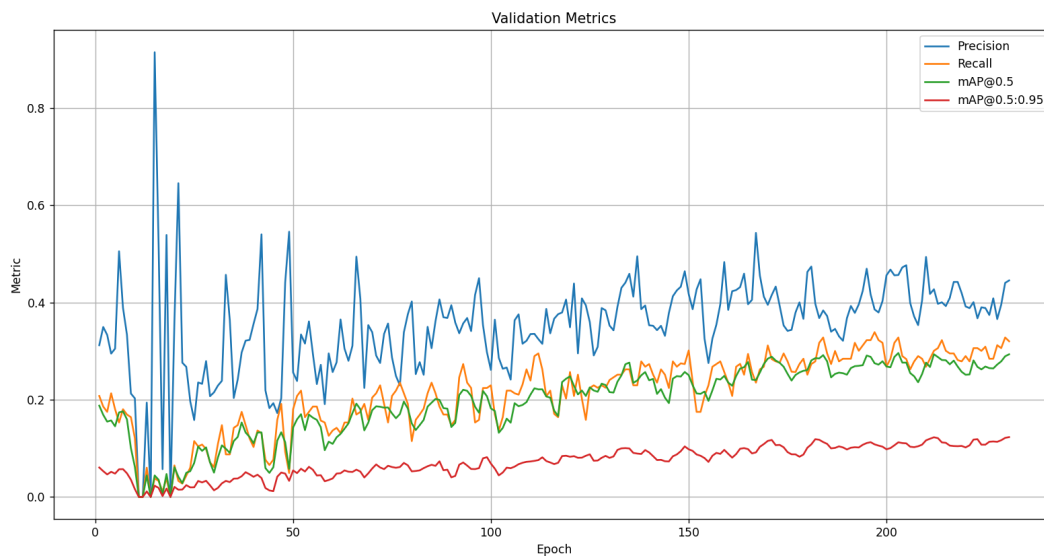


Figura 5.31: Gráfico de avaliação do modelo treinado YOLOV11 *Segmentation(1)*

O *dataset* foi dividido com uma relação de 90% para treino, 10% para validação que nos fornece as métricas do treino e utilizaram-se imagens novas para verificar o desempenho real do modelo. O resultado do treino, com métricas de mAP@50 de 29%, precisão de 44% e 32% de *Recall*. Na figura 5.32 seguem-se as outras métricas relativas ao treino do modelo.

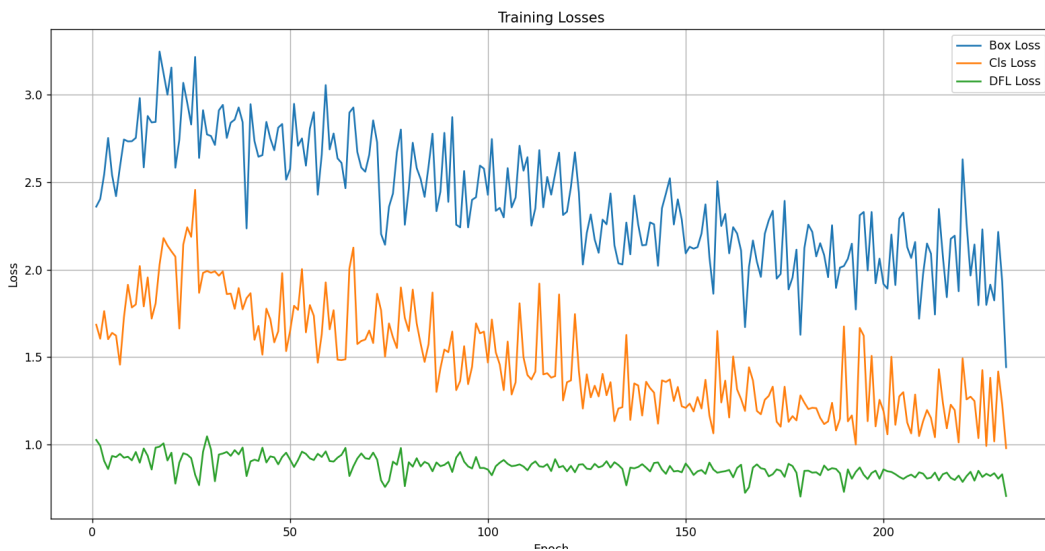


Figura 5.32: Gráfico de avaliação do modelo treinado YOLOV11 *Segmentation(2)*

De forma a perceber o comportamento do modelo na deteção, na figura 5.33, é ilustrada uma imagem que foi inferida pelo modelo.

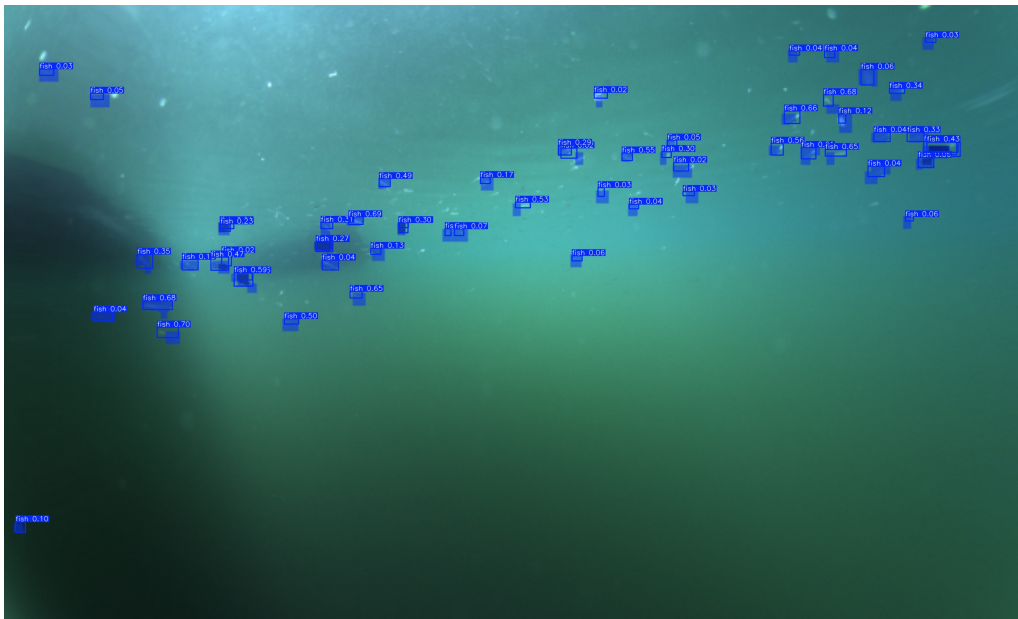
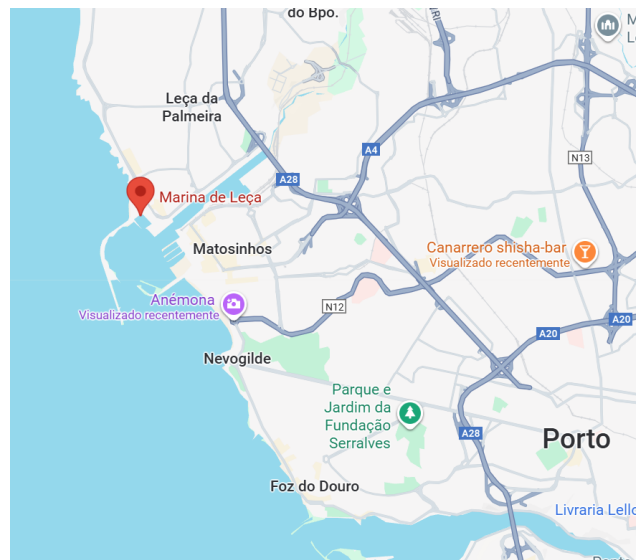


Figura 5.33: Imagem de teste do modelo treinado com *Segmentation*

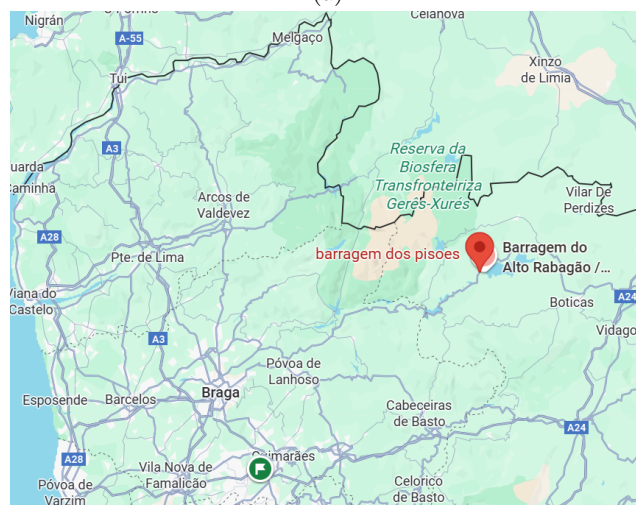
Como pode ser observado na figura 5.33, foram efetuadas 59 deteções de peixes juvenis que foi a grande maioria de peixes da imagem. Acontece que apesar das métricas estarem razoáveis, aparenta obter as *bouding box*, mesmo com baixa precisão neste cenário. Na secção 5.5.4, irão ser efetuados mais testes a nível de medição com estes resultados.

### 5.5.4 Testes em Cenário Real

De forma a avaliar o sistema em situação real com dois cenários diferentes, foram realizadas missões em localizações diferentes, uma na Barragem dos Pisões, em Montalegre, e outra na Marina de Leça. Localizados como indicados na figura 5.34.



(a)



(b)

Figura 5.34: a) Localização da recolha de amostras na Marina de Leça; b) Localização da recolha de amostras na Barragem dos Pisões

O objetivo desta amostragem, é recolher imagens de locais diferentes, uma de água doce e outra de água salgada. Sendo o principal objetivo, recolher imagens suficientes de peixes juvenis e cenários diversos para criar um *dataset* destes na qual existe vagamente conteúdo sobre este tema publicamente.

Portanto, na Marina de Leça, foram recolhidos em dois locais diferentes, o sistema foi submerso a uma profundidade variada de entre 1 a 4 metros. A hora da

recolha foi às 11h no dia 3 de Agosto de 2025, conforme a figura 5.35 (a).

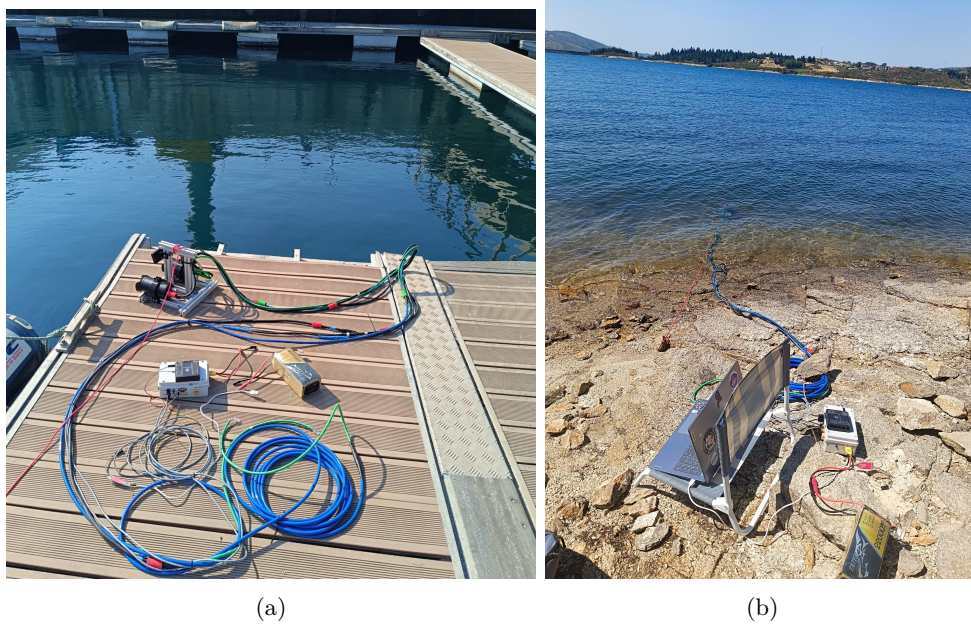


Figura 5.35: a) Recolha de amostras na Marina de Leça; b) Recolha de amostras na Barragem dos Pisões

Na Barragem dos Pisões, foram recolhidos imagens num máximo de meio metro de profundidade, com a hora de recolha às 12h no dia 1 de Agosto de 2025, conforme a figura 5.35 (b) e 5.36.



Figura 5.36: Colocação do sistema na água em Barragem dos Pisões

No que toca as imagens capturadas, na Barragem dos Pisões foram recolhidas 6779 pares de imagens, com uma aquisição de 7min e 53s, ocupando um total de 43 GB. E na Marina de Leça, com um total 1450 pares de imagens, com uma aquisição

de 2 min e 1s, com um total de 8.05 GB, este número reduzido de imagens deve-se às imagens conter peixes juvenis em grande quantidade.

Com isto, são apresentados dois exemplos de imagens capturadas em ambas as localizações. Na figura 5.37, o sistema encontra-se pousado na profundidade do rio, é possível observar alguns peixes juvenis e alguns peixes de maior porte.

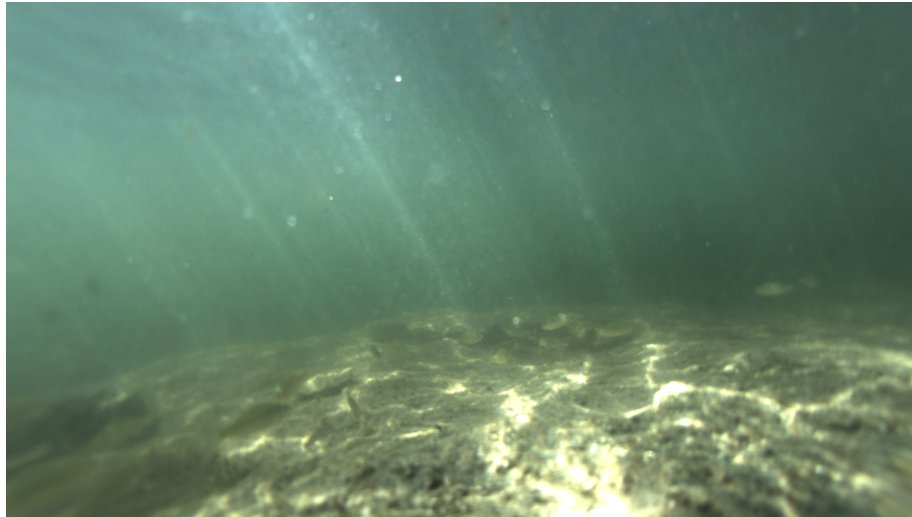


Figura 5.37: Imagem capturada na Barragem de Pisões

Na figura 5.38, encontra-se uma das imagens capturadas na Marina de Leça, é possível observar um cardume de peixes juvenis.



Figura 5.38: Imagem capturada na Marina de Leça

Com as imagens capturadas, dois *dataset* foram compostos, um com todas as imagens da esquerda, ou seja, 8229 imagens, e outro com um conjunto definido de imagens para validação/estudo do sistema. Foi realizada a anotação e o treino do *dataset*, segue-se na secção 5.5.3.

Relativamente ao tópico de interesse de realizar medições automáticas dos peixes juvenis, no seguimento desta secção irá ser demonstrada a validação do algoritmo

proposto para detetar com o modelo de segmentação treinado na secção 5.5.3 e realizar as medições do comprimento dos alvos a detetar.

Como prova de teste, foi utilizado um dos *dataset* com 624 pares de imagens, em que o algoritmo detetou, fez *match* dos peixes entre imagens e detetou automaticamente. Em paralelo, foi desenvolvido o *script* de forma a ser possível medir manualmente, para perceber as diferenças entre automático e manual. Relembrando que já foi testado no Laboratório de Sistemas Autónomos o sistema com objetos conhecidos e descritas as suas margens de erro.

Com as definições do teste para 40% de confiança no modelo de deteção e um *threshold* de 80 mm, que acima desse valor é rejeitado devido a não pertencer à gama de comprimento dos peixes juvenis. Na figura 5.39, é ilustrado um gráfico de regressão linear, na qual no eixo horizontal, representam as medições manuais e no eixo vertical as automáticas.

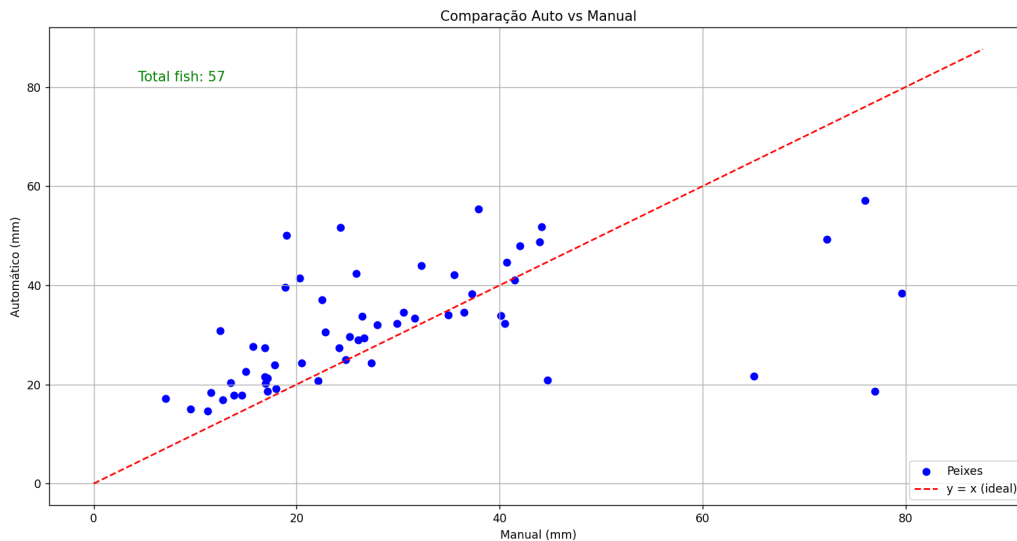


Figura 5.39: Regressão linear dos peixes detetados

Foram detetados ao longo desse *dataset*, 57 peixes, um valor relativamente pequeno comparado com a quantidade de peixes visualmente na imagem, mas existem critérios no *match* entre imagens que reduzem este número. Na figura 5.39, repara-se que o ponto ideal seria encontrar-se na risca vermelha, que significa, tanto a deteção automática e manual coincidiram. A maioria encontra-se próxima do ideal, eventualmente alguns pontos fogem da reta. O grande motivo para haver uma incongruência entre manual e automática, deve-se essencialmente ao modelo detetar erradamente em alguns casos.

Na figura 5.40, são apresentados os resultados estatísticos do processo do algoritmo discutido.

Primeira análise a realizar, será o valor médio entre os comprimentos da medição automática e manual. Observamos anteriormente na figura 5.39 que havia alguns valores bastante dispersos à reta da regressão linear, acontece que ao realizar a média dos valores obtidos, obtemos um valor muito aproximado entre ambos, sendo para a medição automática 31.48 mm e manual 29.42 mm, uma diferença de 2 mm. Isto sugere que é possível realizar um estudo sobre a média do comprimento de uma população num conjunto de imagens num dado local.

```
==== Validation Results ====  
Mean Absolute Error (mm): 10.16  
Mean Squared Error (mm): 15.38  
Mean Relative Error (%): 38.49  
Average length of Automatic: 31.48 mm  
Average length of Manual: 29.42 mm
```

Figura 5.40: Resultados estatísticos das medições

Podemos aferir que, tendo um erro relativo de 38.49%, deve-se essencialmente aos valores que estão muito dispersos do real. O erro absoluto médio resultou em 10.16 mm, portanto, arredondado a 1 cm. Dado que os peixes juvenis têm dimensões de 1-5 cm, e com um modelo de detecção treinado apenas para validação, é um resultado promissor.

## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalho Futuro

### 6.1 Conclusões

Este projeto de dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento de um protótipo de um sistema de aquisição de imagem de alta resolução para peixes, baseado numa configuração de par estéreo, ou seja, duas câmaras e um sistema de iluminação que fosse capaz de obter imagens deste tipo de peixes em ambiente subaquático.

Foi realizada uma apreciação de mercado em que foram identificados vários cenários de aplicação, tipos de tecnologia utilizados e métodos de deteção. Também se efetuou uma análise comparativa dos métodos e sistemas de captação de plâncton existentes, bem como dos peixes juvenis.

Concretizado o estudo de mercado e baseado nos requisitos dos objetos definidos, foi apresentada uma arquitetura e projeto do sistema, onde foi elaborada uma análise para cada componente e os escolhidos para o projeto.

Foi desenvolvido e implementado um protótipo funcional possuindo uma solução ótica com uma resolução de 3.2 MP, com um tamanho de pixel de  $3.45 \mu\text{m}$  de cada câmara. Na tabela 4.3 são apresentados os diferentes campos de visão em que a área de captação é comum em ambas as câmaras, tendo sido realizados para as distâncias de um, três e cinco metros.

O sistema foi inicialmente testado em condições laboratoriais, na qual foram realizados vários testes a nível de garantir que os cilindros são estanques. De seguida, foi calibrado o ajuste do foco com a *dome* que provoca distorção no tanque de água.

Por fim, realizou-se a calibração das câmaras para obter os parâmetros intrínsecos e extrínsecos debaixo d'água e validou-se com a medição de objetos conhecidos com a triangulação.

Realizados os testes laboratoriais, foram realizadas duas missões no terreno, uma na Barragem de Pisões e outra na Marina de Leça. Tendo sido recolhidos 8229 pares de imagens pelo sistema.

A análise posterior das imagens com treinos de modelo *deep-learning* e validação do método de medição automática de peixes juvenis, provou que é possível com a estratégia implementada, ter um sistema funcional para capturar imagens, detetar e medir automaticamente peixes juvenis. Concluiu-se assim que, a análise realizada no terreno, com as imagens recolhidas na Marina de Leça, resultou numa média de comprimento de peixes juvenis de 3.41 cm.

Em suma, pode-se concluir que os objetivos propostos no início desta dissertação foram cumpridos na sua totalidade.

## 6.2 Trabalho Futuro

Para trabalho futuro, irá ser destacado de forma sucinta os tópicos para desenvolvimento e melhorias:

- Estudo e análise de câmaras de alta definição a nível de megapíxeis e melhores resoluções, podendo se obter melhores resultados ao visualizar os peixes juvenis dado que são de pequeno porte.
- Implementação de um sistema autónomo para a captura de imagens, na qual seria resolvida a limitação do comprimento de cabos que faz com que não seja prático a captura de imagens com mais profundidade.
- Estudo e análise de métodos *deep-learning* para deteções de alvos de pequena dimensão como peixes juvenis, que seja eficaz nas deteções e mais protegido contra falsos positivos.
- Realização de mais cenários de testes, como por exemplo à noite, em que não há luz solar, depende apenas do sistema de iluminação SLS.
- Estudo e implementação de novos cilindros para as câmaras, na qual houve certas limitações a nível de perda de vácuo, na qual a integridade das câmaras pode ser comprometida.

# Referências

- [1] C. S. Reynolds, ed., *Ecology of phytoplankton*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. [Citado na página 1]
- [2] A. M. et al., “Marineye - a tool for marine monitoring,” pp. 1–7, 04 2006. [Citado na página 2]
- [3] CIIMAR, “Marineye.” Available at <https://marineye.ciimar.up.pt/>. (Último acesso em 11/06/2024). [Citado nas páginas vii e 2]
- [4] INESTEC, “Coral project presents deep sea challenges in portugal.” Available at <https://www.inesctec.pt/en/news/coral-project-presents-deep-sea-challenges-in-portugal#about/>. (Último acesso em 13/06/2024). [Citado na página 3]
- [5] K. Magalhães, “O fitoplâncton marinho,” pp. 28–35, 07 2015. [Citado nas páginas vii, 6, 7, 8, 9, 10 e 11]
- [6] E. huxleyi, “A alga marinha mais comum consegue adaptar-se à acidificação dos oceanos.” <https://www.publico.pt/2012/04/09/ciencia/noticia/a-alga-marinha-mais-comum-consegue-adaptarse-a-acidificacao-dos-oceanos-1541384>. (Último acesso em 17/09/2024). [Citado nas páginas vii e 10]
- [7] Acuinuga, “Isochrysis 18 (Último acesso em 17/09/2024). [Citado nas páginas vii e 10]
- [8] F. Chang, “Dictyocha (dictyochophyceae).” (Último acesso em 19/09/2024). [Citado nas páginas vii e 11]
- [9] W. H. O. Institution, “Jellyfish other zooplankton.” <https://www.whoi.edu/know-your-ocean/ocean-topics/ocean-life/jellyfish-other-zooplankton/>. (Último acesso em 19/09/2024). [Citado na página 12]
- [10] P. D. M. Katsuragawa, “Plâncton.” Available at <https://www.io.usp.br/index.php/ocean-coast-res/29-portugues/publicacoes/series-divulgacao/vida-e-biodiversidade/809-plancton.html>, 2024. (Último acesso em 03/06/2024). [Citado nas páginas vii e 12]

- [11] T. R. S. M. P. H. e. D. F. P. Filipe Guilherme Ramos Costa Neves, Fernanda Cabral Jeronimo, “Copépodes: a fauna dominante do plâncton marinho tropical.” <https://www.bioicos.org.br/post/copepodes-a-fauna-dominante-do-plancton-marinho-tropical>. (Último acesso em 23/09/2024). [Citado nas páginas vii e 13]
- [12] D. L. M. A. Elmoor-Loureiro, “Cladocera do brasil.” <https://cladoceradobrasil.wordpress.com/glossario/>. (Último acesso em 23/09/2024). [Citado nas páginas vii e 14]
- [13] C. Savard, “Rotíferos: uma introdução ao mundo microscópico dos animais de roda.” <https://www.olympus-lifescience.com/pt/discovery/rotifers-an-introduction-to-the-microscopic-world-of-wheel-animals/>. (Último acesso em 24/09/2024). [Citado nas páginas vii e 15]
- [14] M. V. dos Santos, “Zoologia - crustáceos.” <https://www.biologianet.com/zoologia/crustaceos.htm>. (Último acesso em 24/09/2024). [Citado nas páginas viii e 16]
- [15] V. S. dos Santos, “Cnidários.” <https://brasilecola.uol.com.br/biologia/filo-cnidaria.htm>. (Último acesso em 26/09/2024). [Citado nas páginas viii, 16 e 17]
- [16] I. O. Commission, “Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis.” *Manuals and Guides*. (Último acesso em 19/11/2024). [Citado nas páginas viii, 18, 19 e 20]
- [17] ASLO, “Zooglider: An autonomous vehicle for optical and acoustic sensing of zooplankton,” pp. 69–86, 2019. [Citado nas páginas viii, 20 e 21]
- [18] C. D. et al., “A three-axis fast-tow digital video plankton recorder for rapid surveys of plankton taxa and hydrography.” *Limnology and Oceanography: Methods* 3. (Último acesso em 29/10/2024). [Citado nas páginas viii, 22, 23, 24 e 38]
- [19] H. B. et al., “A semi-automated image analysis procedure for in situ plankton imaging systems,” pp. 1–17, 2015. [Citado nas páginas viii, 24, 25, 26 e 38]
- [20] S. M. et al., “An autonomous system for gelatinous zooplankton image-based recognition,” 2015. [Citado nas páginas viii, 26, 27, 28 e 38]
- [21] CHDK, “Canon hack development kit.” <https://chdk.fandom.com/wiki/CHDK>. (Último acesso em 07/11/2024). [Citado na página 27]
- [22] E. C. O. et al., “The scripps plankton camera system: A framework and platform for in situ microscopy.” *Limnology and Oceanography Methods* (2020). (Último acesso em 12/11/2024). [Citado nas páginas viii, 28, 29 e 38]

- [23] A. J. T. J. A.J. Richardson, A.W. Walne, “Progress in oceanography,” pp. 27–74, 01 2006. [Citado na página 30]
- [24] F. Delorme *et al.*, “A multiple opening and closing plankton sampler based on the mocness and n.i.o. nets,” *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, vol. 34, p. 1230–1235, 2011. [Citado na página 30]
- [25] H. Bios, “Multinet mammoth 1 m2.” <https://www.hydrobios.de/en/products>. (Último acesso em 17/10/2024). [Citado na página 30]
- [26] J. G. e. L. F. M. S. Schmid, C. Aubry, “The loki underwater imaging system and an automatic identification model for the detection of zooplankton taxa in the arctic ocean,” pp. 129–160, 2016. [Citado nas páginas viii, ix, 30, 31, 32 e 33]
- [27] M. C. Cyril Barrelet and G. Subsol, “Automatic coral reef fish identification and 3d measurement in the wild,” pp. 1–25, 2023. [Citado nas páginas viii, ix, 32, 33, 34 e 39]
- [28] R. Cheng, C. Zhang, Q. Xu, G. Liu, Y. Song, X. Yuan, and J. Sun, “Underwater fish body length estimation based on binocular image processing,” *Information*, vol. 11, no. 10, p. 476, 2020. [Citado nas páginas ix, 34, 35, 36, 37 e 39]
- [29] TechTarget, “What is field of view (fov).” <https://www.techtarget.com/whatis/definition/field-of-view-FOV>. (Último acesso em 30/06/2024). [Citado na página 42]
- [30] T. P. Instruments, “Field of view and angular field of view.” <https://www.princetoninstruments.com/learn/camera-fundamentals/field-of-view-and-angular-field-of-view>. (Último acesso em 22/06/2024). [Citado nas páginas 42 e 46]
- [31] A. Fotografia, “Abertura do diafragma: para que serve e a sua importância na fotografia..” <https://www.aprender-fotografia.com/abertura-diafragma/>. (Último acesso em 02/07/2024). [Citado nas páginas 43, 44 e 45]
- [32] E. Optics, “Understanding focal length and field of view.” <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/understanding-focal-length-and-field-of-view/>. (Último acesso em 12/07/2024). [Citado nas páginas 45 e 46]
- [33] Q. Hu, K. Wang, F. Ren, and Z. Wang, “Research on underwater robot ranging technology based on semantic segmentation and binocular vision,” *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, 2024. [Citado nas páginas ix, 47, 49, 51 e 52]

- [34] S. F. W. Y. J. Q. Q. C. C. Z. Yan Hua, Zhongwei Lianga, “Calibration and rectification of bi-telecentric lenses in scheinpflug condition,” pp. 1–7, 11 2021. [Citado nas páginas ix, 54 e 55]
- [35] O. Engineering, “Illumination geometries and techniques.” <https://www.optoe.com/en/basics/illumination-geometries-and-techniques>. (Último acesso em 03/09/2024). [Citado nas páginas ix, 55, 56, 57, 58 e 59]
- [36] A. D. Grand, “O que é microscopia de campo escuro?.” <https://www.olympus-lifescience.com/pt/discovery/what-is-darkfield-microscopy/>. (Último acesso em 09/09/2024). [Citado na página 59]
- [37] Omniafishing, “Aqua-vu micro revolution 5.0 underwater camera.” <https://www.omniafishing.com/p/aqua-vu-micro-revolution-5-0>. (Último acesso em 21/06/2025). [Citado nas páginas ix e 63]
- [38] TELEDYNE, “Chameleon3 usb3: 5 mp, mono, cs-mount.” <https://www.teledynevisionsolutions.com/en-150/products/chameleon3-usb3/?model=CM3-U3-50S5M-CSvertical=machine+visionsegment=iisaPage=1aTops=514139>. (Último acesso em 02/07/2025). [Citado na página 67]
- [39] E. optics, “Lucid vision labs triton™ tri120s-cc.” <https://www.edmundoptics.com/p/lucid-vision-labs-tritontrade-tri120s-cc-sony-imx304-123mp-color-camera/41833/?srsltid=AfmBOor77NauBKlkgKvkGWz4eUnzdSI4Phg7-sBaQ0L2BamRUa4nwmRP>. (Último acesso em 02/07/2025). [Citado na página 67]
- [40] E. optics, “Bfly-pge-31s4m/c-c 1/1.8.” <https://www.edmundoptics.com/p/bfly-pge-31s4mc-c-118-blackflyreg-poe-gige-color-camera/3874/>. (Último acesso em 02/07/2025). [Citado na página 67]
- [41] TELEDYNE, “Grasshopper3 usb3: 5 mp, mono, c-mount.” <https://www.teledynevisionsolutions.com/products/grasshopper3-usb3/?model=GS3-U3-51S5M-Cvertical=machine> (Último acesso em 02/07/2025). [Citado na página 67]
- [42] THORLABS, “Lentes para câmera para visão da máquina, suporte em c.” <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=MVL4WA>. (Último acesso em 02/07/2025). [Citado nas páginas x e 68]
- [43] Ultralytics, “Documentação - ultralytics yolo11.” <https://docs.ultralytics.com/pt/models/yolo11/supported-tasks-and-modes>. (Último acesso em 22/08/2025). [Citado na página 92]

Anexo A

# Desenhos da Estrutura Mecânica

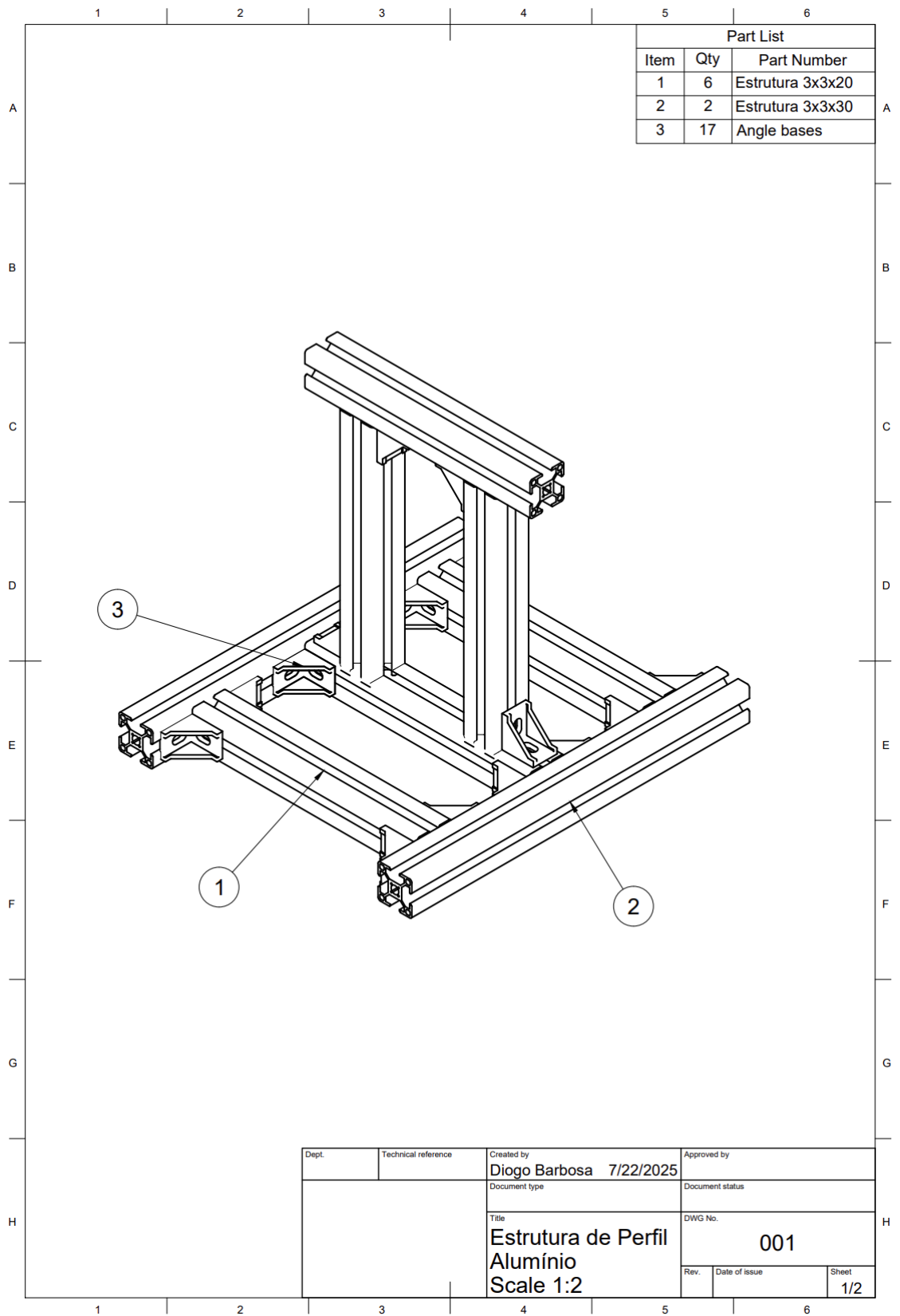


Figura A.1: Ilustração da Estrutura de Perfil Alumínio.

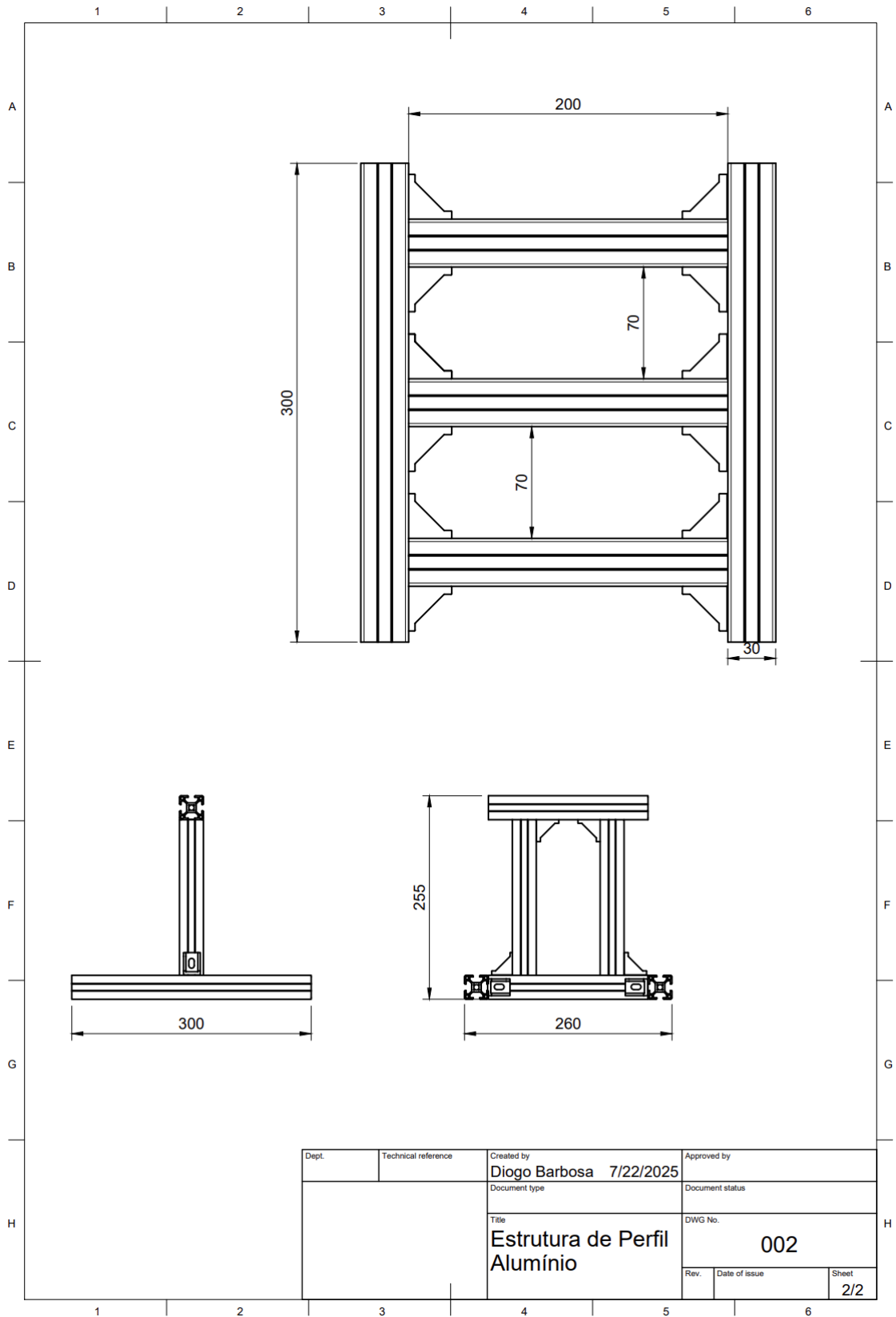


Figura A.2: Medidas da Estrutura de Perfil Alumínio.

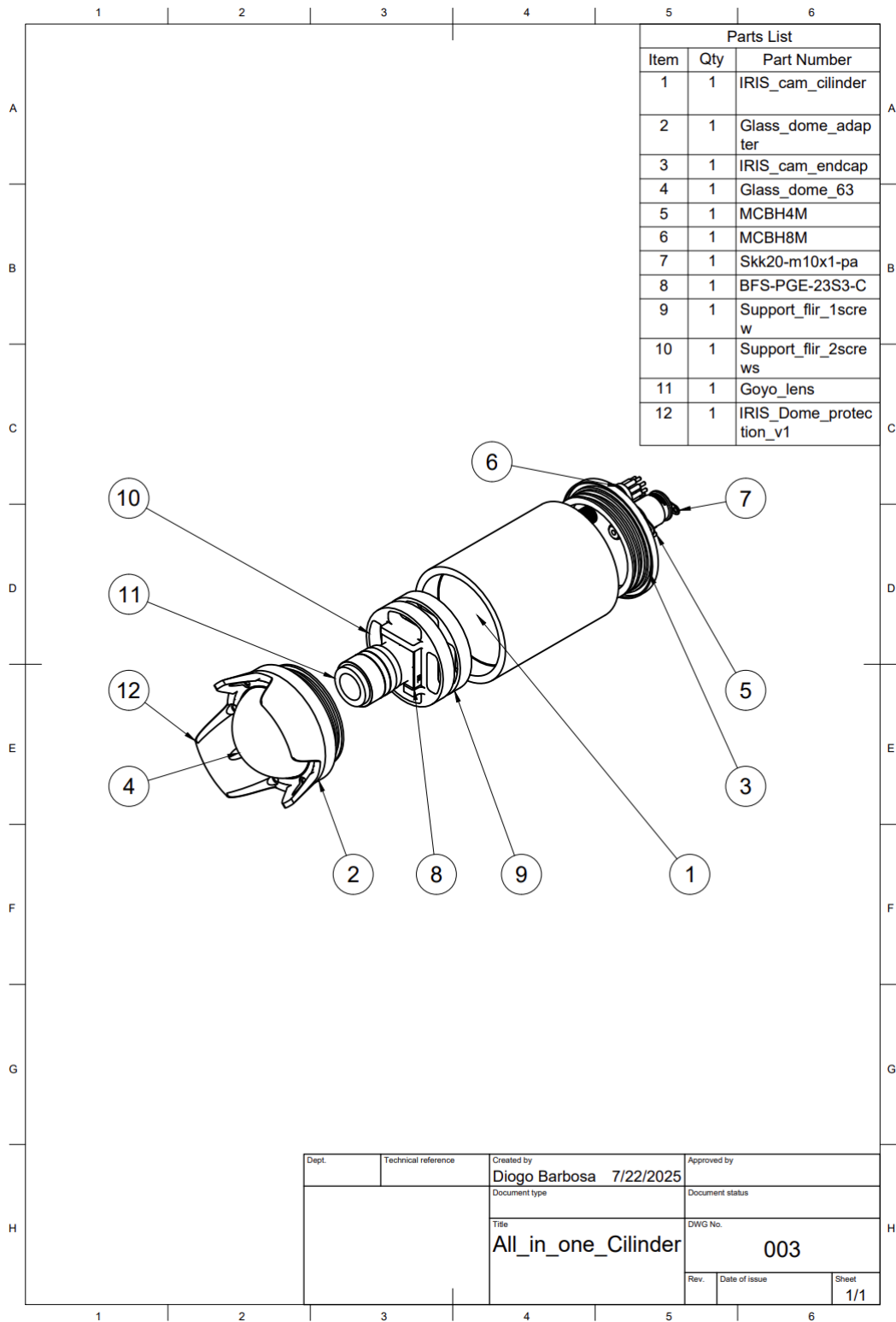


Figura A.3: Ilustração da cilindro completo.

Dept.	Technical reference	Created by <b>Diogo Barbosa 7/22/2025</b>	Approved by
		Document type	Document status
		Title <b>All_in_one_Cilinder</b>	DWG No. <b>003</b>
		Rev.	Date of issue
			Sheet <b>1/1</b>

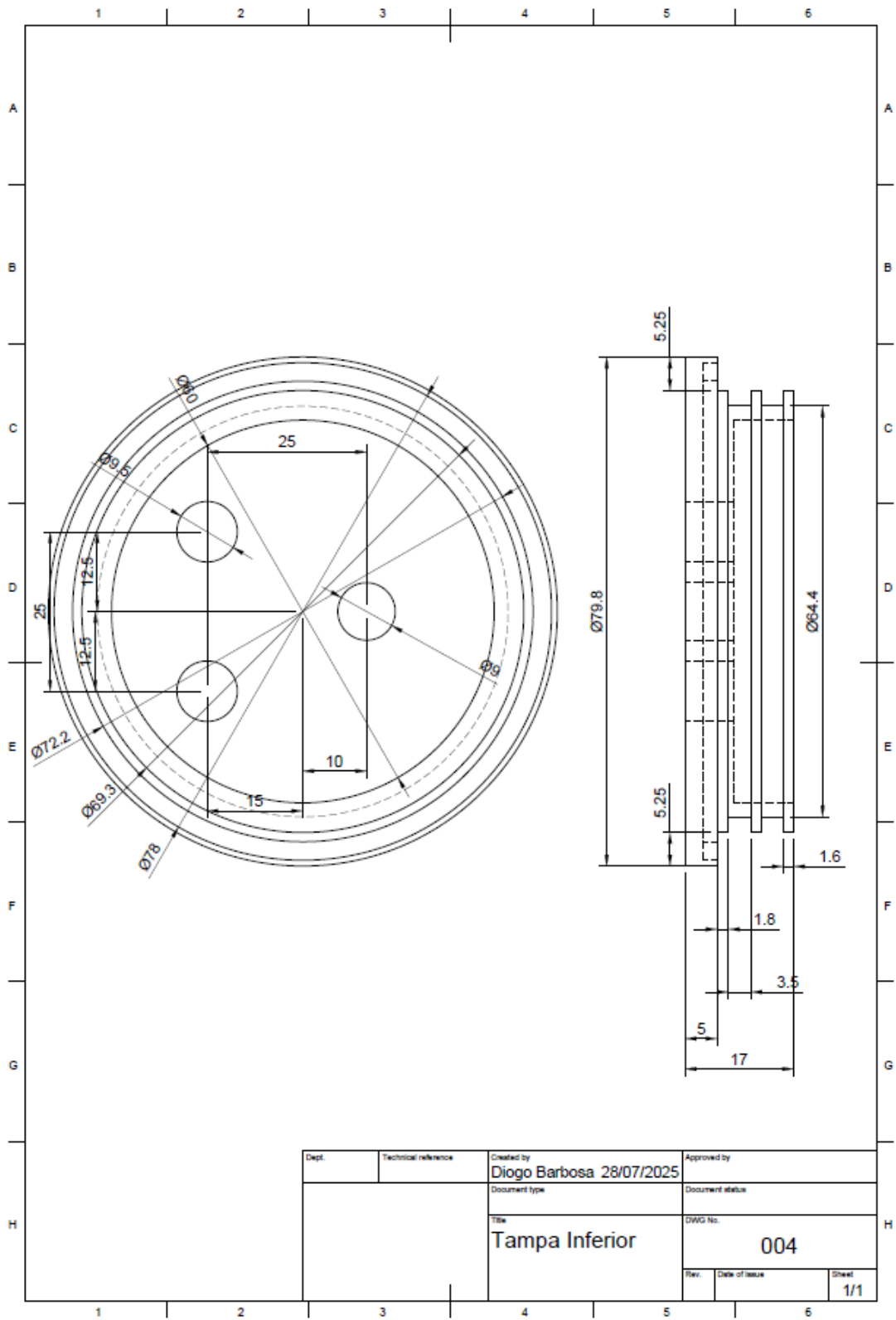


Figura A.4: Medidas da Tampa Inferior.

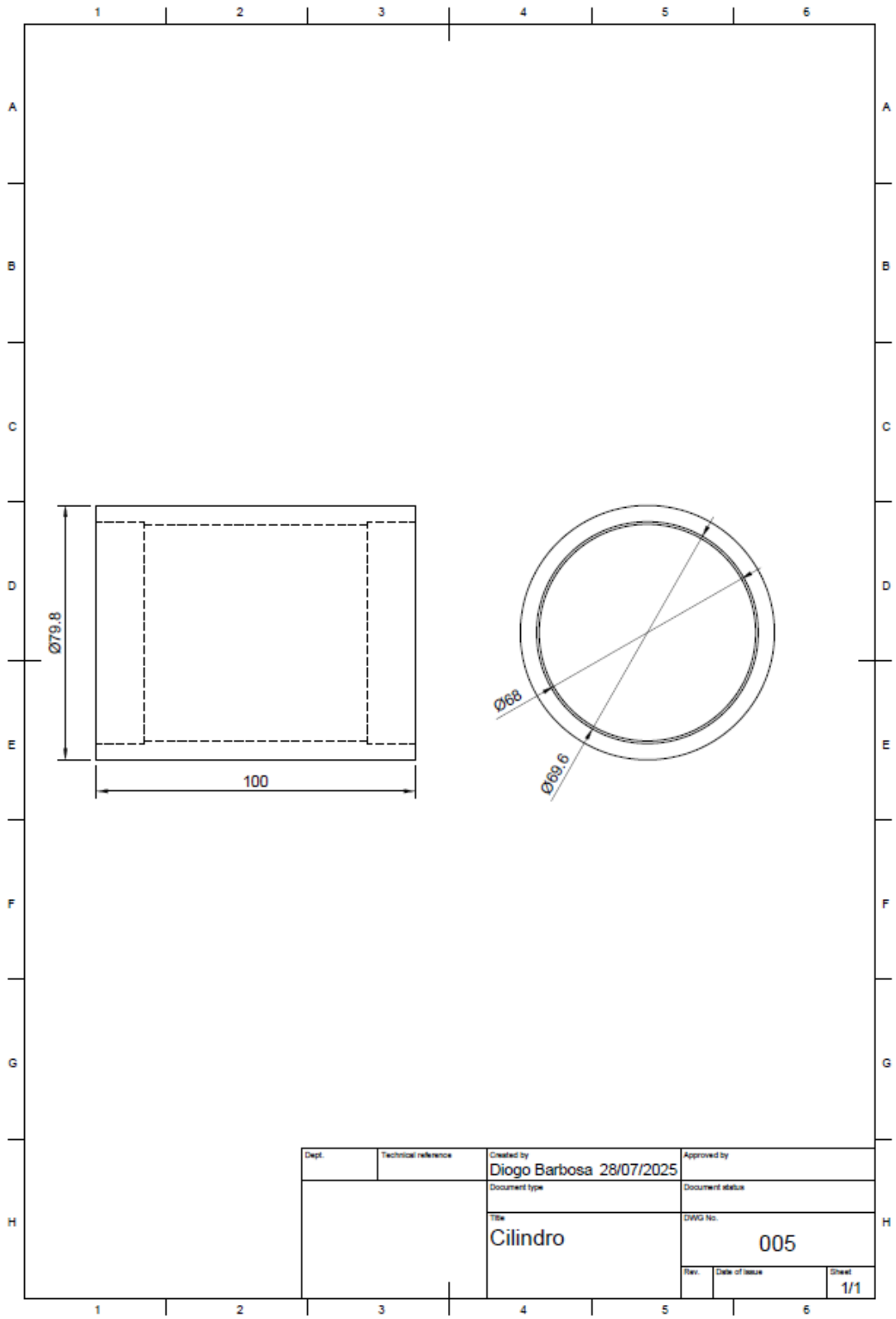


Figura A.5: Medidas do Cilindro.

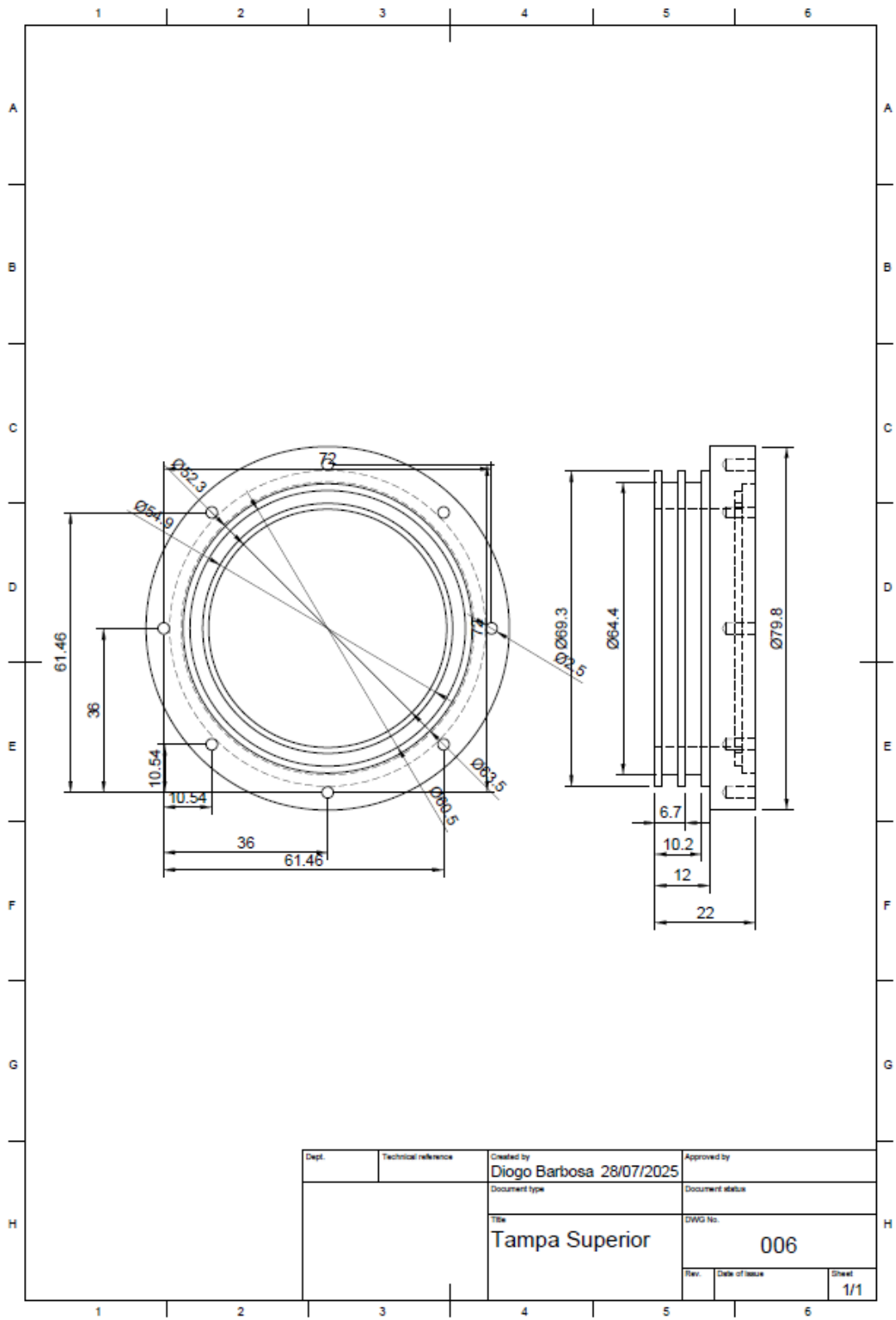


Figura A.6: Medidas da Tampa Superior.

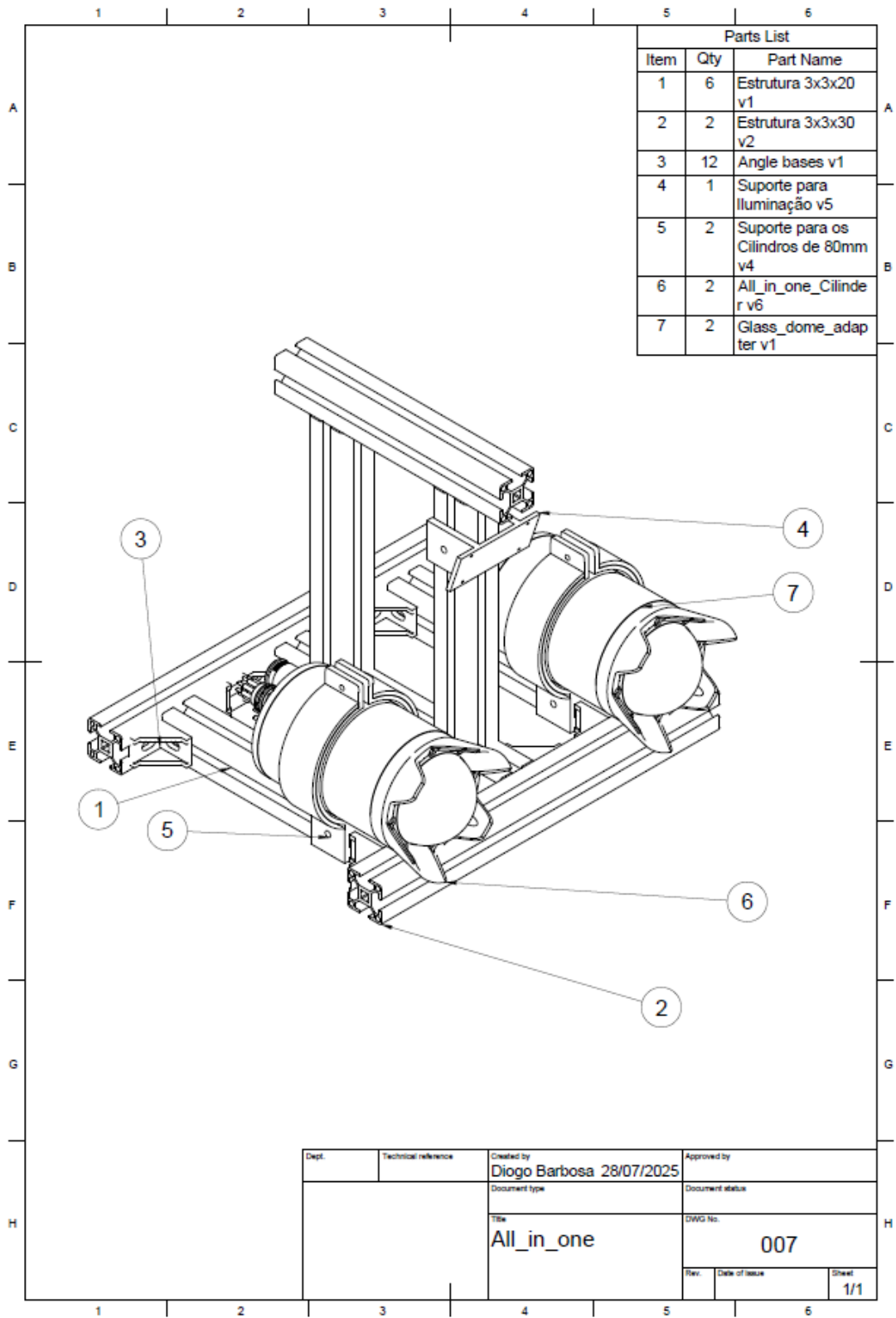


Figura A.7: Ilustração da Montagem Completa do Sistema.



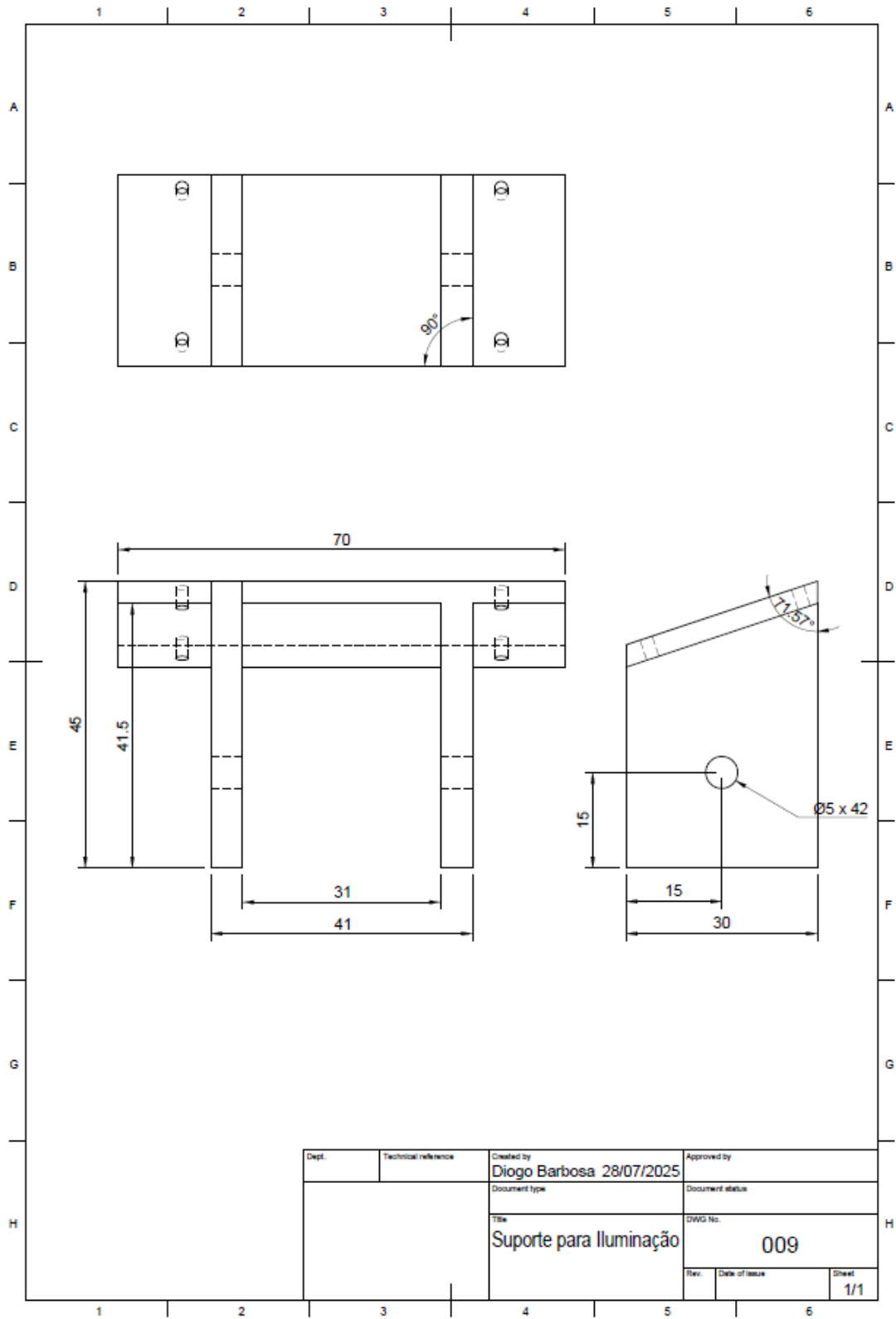


Figura A.9: Medidas do Suporte da Iluminação.

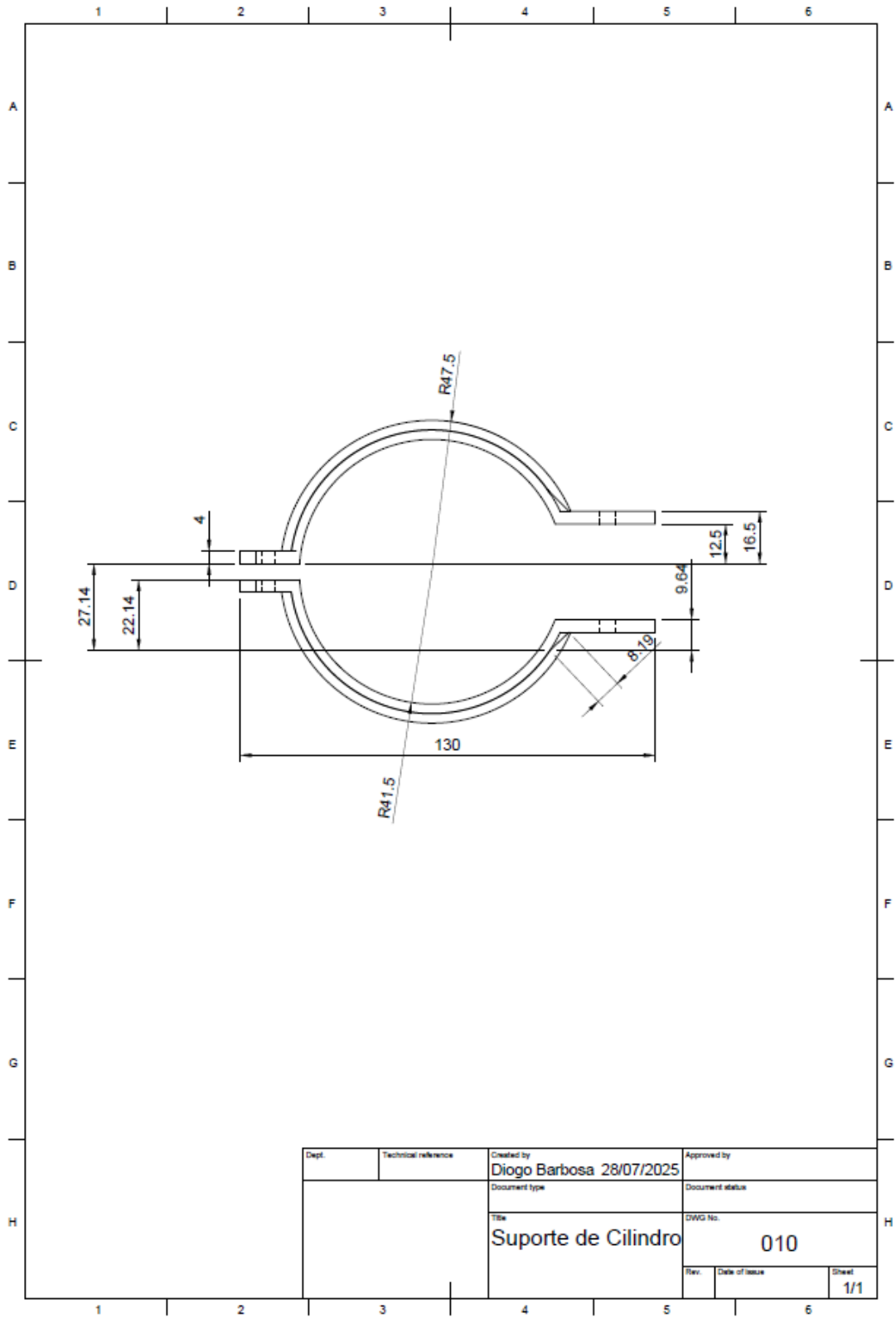


Figura A.10: Medidas do Suporte dos Cilindros.



Anexo B

# Algoritmo desenvolvido para o projecto

---

```

1 load('stereoParamsForRectification.mat');
2
3 % === 1. Rectify Dataset ===
4 inputFolderLeft = 'C:\Users\Diogo_Barbosa\Desktop\Tese\
    Calibration_Folder\images_for_calibration_24_07_teses\left';
5 inputFolderRight = 'C:\Users\Diogo_Barbosa\Desktop\Tese\
    Calibration_Folder\images_for_calibration_24_07_teses\right';
6 outputFolderLeft = 'C:\Users\Diogo_Barbosa\Desktop\Tese\
    Calibration_Folder\images_retified_from_calibration_24_07_teses
    \left';
7 outputFolderRight = 'C:\Users\Diogo_Barbosa\Desktop\Tese\
    Calibration_Folder\images_retified_from_calibration_24_07_teses
    \right';
8
9 if ~exist(outputFolderLeft, 'dir'), mkdir(outputFolderLeft); end
10 if ~exist(outputFolderRight, 'dir'), mkdir(outputFolderRight); end
11
12 leftImages = dir(fullfile(inputFolderLeft, '*.png')); % or .jpg
13 rightImages = dir(fullfile(inputFolderRight, '*.png'));
14 assert(numel(leftImages) == numel(rightImages), 'Image count
    mismatch');
15
16 for i = 1:numel(leftImages)
17     % Read original images
18     I1 = imread(fullfile(inputFolderLeft, leftImages(i).name));
19     I2 = imread(fullfile(inputFolderRight, rightImages(i).name));
20
21     [J1, J2] = rectifyStereoImages(I1, I2, stereoParams, ...
22         'OutputView', 'valid'); % or 'full' if you prefer
23         uncropped
24
25     % Save
26     imwrite(J1, fullfile(outputFolderLeft, leftImages(i).name));
27     imwrite(J2, fullfile(outputFolderRight, rightImages(i).name));
28
29     fprintf('Rectified %s and %s\n', ...
30         leftImages(i).name, rightImages(i).name);
31 end
32 disp('Dataset rectification complete.');
```

---

Listagem B.1: Algoritmo de Retificação de Imagens Estéreo do dataset com MATLAB

---

```

1  % === 1. Extract Intrinsic ===
2  K1 = stereoParams.CameraParameters1.IntrinsicMatrix';
3  K2 = stereoParams.CameraParameters2.IntrinsicMatrix';
4  D1 = [stereoParams.CameraParameters1.RadialDistortion(1:2), ...
5        stereoParams.CameraParameters1.TangentialDistortion];
6  D2 = [stereoParams.CameraParameters2.RadialDistortion(1:2), ...
7        stereoParams.CameraParameters2.TangentialDistortion];
8  imageSize = stereoParams.CameraParameters1.ImageSize;
9
10 % === 2. Extrinsic ===
11 R = stereoParams.RotationOfCamera2;
12 T = stereoParams.TranslationOfCamera2(:);
13
14 % === 3. Rectification Params ===
15 % Compute the rectification transforms (Hartley's method)
16 % Reference: Hartley & Zisserman's "Multiple View Geometry"
17 [~, ~, R1, R2] = computeRectificationMatrices(K1, K2, R, T);
18 % Display results
19 disp('Rectification rotation for Camera 1 (R1):'); disp(R1);
20 disp('Rectification rotation for Camera 2 (R2):'); disp(R2);
21
22 baseline = norm(T); % in same units as calibration
23 P1 = [K1, zeros(3,1)];
24 P2 = [K2, K2 * [baseline; 0; 0]];
25 f = K1(1,1); % focal length (fx)
26 cx = K1(1,3); % principal point x
27 cy = K1(2,3); % principal point y
28 Tx = -baseline; % baseline (negative if right camera moved
29     along +x)
30 Q = [ ...
31     1, 0, 0, -cx; ...
32     0, 1, 0, -cy; ...
33     0, 0, 0, f; ...
34     0, 0, -1/Tx, 0 ];
35
36 % === 4. Export to YAML ===
37 save('stereoParamsForRectification.mat', ...
38     'K1', 'K2', 'D1', 'D2', 'R', 'T', 'R1', 'R2', 'P1', 'P2', 'Q',
39     'imageSize')
40 fileID = fopen('stereo_params_opencv.yaml', 'w');
41 fprintf(fileID, '%YAML:1.0\n');
42 writeOCVMMatrix(fileID, 'K1', K1);
43 writeOCVMMatrix(fileID, 'D1', D1);
44 writeOCVMMatrix(fileID, 'K2', K2);
45 writeOCVMMatrix(fileID, 'D2', D2);
46 writeOCVMMatrix(fileID, 'R', R);
47 writeOCVMMatrix(fileID, 'T', T);
48 writeOCVMMatrix(fileID, 'R1', R1);
49 writeOCVMMatrix(fileID, 'R2', R2);

```

```

48 writeOCVMatrix(fileID, 'P1', P1);
49 writeOCVMatrix(fileID, 'P2', P2);
50 writeOCVMatrix(fileID, 'Q', Q);
51 writeOCVMatrix(fileID, 'image_size', fliplr(imageSize)); % width,
    height
52 fclose(fileID);
53 disp('    Calibration & rectification parameters exported to YAML.
    ');
54
55 % === Helper Function ===
56 function writeOCVMatrix(fid, name, mat)
57     mat = double(mat);
58     [rows, cols] = size(mat);
59     fprintf(fid, '%s: !!opencv-matrix\n', name);
60     fprintf(fid, '  rows: %d\n', rows);
61     fprintf(fid, '  cols: %d\n', cols);
62     fprintf(fid, '  dt: d\n');
63     fprintf(fid, '  data: [');
64     for r = 1:rows
65         for c = 1:cols
66             fprintf(fid, '%.8f', mat(r,c));
67             if ~(r == rows && c == cols), fprintf(fid, ', '); end
68         end
69     end
70     fprintf(fid, ']\n');
71 end
72
73 % Helper function (if MATLAB doesn't have built-in rectification)
74 function [H1, H2, R1, R2] = computeRectificationMatrices(K1, K2, R
    , T)
75     % Compute the new rotation matrix for both cameras
76     % Step 1: Compute the new X-axis (baseline direction)
77     v1 = T / norm(T);
78     % Step 2: Compute the new Y-axis (orthogonal to X and old Z)
79     v2 = cross([0; 0; 1], v1);
80     v2 = v2 / norm(v2);
81     % Step 3: Compute the new Z-axis (orthogonal to X and Y)
82     v3 = cross(v1, v2);
83     % New rotation matrix (same for both cameras)
84     R_new = [v1'; v2'; v3'];
85     % Rectification rotations for each camera
86     R1 = R_new; % For Camera 1
87     R2 = R_new * R'; % For Camera 2 (adjusts for original rotation
    )
88     % Homography matrices (if needed)
89     H1 = (K1 * R1) / K1; % For Camera 1
90     H2 = (K2 * R2) / K2; % For Camera 2
91 end

```

---

```
1 import cv2
2 import numpy as np
3
4 # ---- Load Stereo Params
5 Q = np.array([
6     [1.00000000, 0.00000000, 0.00000000, -1035.78392744],
7     [0.00000000, 1.00000000, 0.00000000, -774.41127921],
8     [0.00000000, 0.00000000, 0.00000000, 1150.56910384],
9     [0.00000000, 0.00000000, 0.00504984, 0.00000000]
10 ])
11 # ---- Load Images ----
12 img_left = cv2.imread(r"C:\Users\Diogo_Barbosa\Desktop\Tese\
    Calibration_Folder\monte_alegre_few_images_retified\left\
    imagem_left_10.png", cv2.IMREAD_COLOR)
13 img_right = cv2.imread(r"C:\Users\Diogo_Barbosa\Desktop\Tese\
    Calibration_Folder\monte_alegre_few_images_retified\right\
    imagem_right_10.png", cv2.IMREAD_COLOR)
14
15 # ---- Resize for display (fit to screen) ----
16 scale_factor = 0.5 # You can change this depending on your screen
    size
17 img_left_display = cv2.resize(img_left, None, fx=scale_factor, fy=
    scale_factor)
18 img_right_display = cv2.resize(img_right, None, fx=scale_factor,
    fy=scale_factor)
19
20 # ---- Mouse click points ----
21 points_left = []
22 points_right = []
23
24 def click_left(event, x, y, flags, param):
25     if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN and len(points_left) < 2:
26         # Scale back to original coordinates
27         x_orig = int(x / scale_factor)
28         y_orig = int(y / scale_factor)
29         points_left.append((x_orig, y_orig))
30         # Draw on display image
31         cv2.circle(img_left_display, (x, y), 3, (0, 255, 0), -1)
32
33 def click_right(event, x, y, flags, param):
34     if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN and len(points_right) < 2:
35         # Scale back to original coordinates
36         x_orig = int(x / scale_factor)
37         y_orig = int(y / scale_factor)
38         points_right.append((x_orig, y_orig))
39         # Draw on display image
40         cv2.circle(img_right_display, (x, y), 3, (0, 255, 0), -1)
41
42
```

```
43 # ---- Get user clicks ----
44 cv2.imshow("Left Image - Click 2 points", img_left_display)
45 cv2.setMouseCallback("Left Image - Click 2 points", click_left)
46
47 cv2.imshow("Right Image - Click same 2 points", img_right_display)
48 cv2.setMouseCallback("Right Image - Click same 2 points",
49                       click_right)
50
51 while True:
52     cv2.imshow("Left Image - Click 2 points", img_left_display)
53     cv2.imshow("Right Image - Click same 2 points",
54               img_right_display)
55     if len(points_left) == 2 and len(points_right) == 2:
56         break
57     if cv2.waitKey(1) & 0xFF == 27: # ESC to quit
58         break
59
60 cv2.destroyAllWindows()
61
62 # ---- Triangulate ----
63 points4D = []
64 for (pl, pr) in zip(points_left, points_right):
65     disparity = pl[0] - pr[0]
66     point_3d = cv2.perspectiveTransform(
67         np.array([[pl[0], pl[1], disparity]]], dtype=np.float32),
68         Q.reshape((4, 4))
69     )[0][0]
70     points4D.append(point_3d[:3]) # discard homogeneous scale
71
72 # ---- Compute Length ----
73 p1, p2 = np.array(points4D)
74 length = np.linalg.norm(p1 - p2)
75 print(f"Estimated 3D length: {length:.2f} mm (based on Q matrix
76       units)")
```

Listagem B.3: Algoritmo de Verificação de Parâmetros da Calibração com Objetos

---

```
1
2 import cv2
3 from ultralytics import YOLO
4 from glob import glob
5 import os
6 from natsort import natsorted
7 import yaml
8 from scipy.optimize import linear_sum_assignment
9 import pandas as pd
10 import matplotlib.pyplot as plt
11 from sklearn.metrics import mean_absolute_error,
    mean_squared_error
12 import numpy as np
13
14
15 # ===== Load configuration =====
16 def load_config(config_path):
17     with open(config_path, 'r') as f:
18         return yaml.safe_load(f)
19
20 # ===== Load calibration =====
21 def load_calibration(filename):
22     fs = cv2.FileStorage(filename, cv2.FILE_STORAGE_READ)
23     P1 = fs.getNode("P1").mat()
24     P2 = fs.getNode("P2").mat()
25     fs.release()
26     return P1, P2
27
28 # ===== Hungarian Matching with Epipolar
    =====
29 def match_detections_epipolar(left_boxes, right_boxes,
30                               max_y_diff=5, min_x_diff=10,
31                               max_x_diff=500,
32                               size_similarity_threshold=0.5):
33     if len(left_boxes) == 0 or len(right_boxes) == 0:
34         return []
35     cost_matrix = np.full((len(left_boxes), len(right_boxes)),
36                           fill_value=1e6)
37
38     for i, l_box in enumerate(left_boxes):
39         lx1, ly1, lx2, ly2 = l_box
40         l_cx, l_cy = (lx1 + lx2) / 2, (ly1 + ly2) / 2
41         l_area = (lx2 - lx1) * (ly2 - ly1)
42
43         for j, r_box in enumerate(right_boxes):
44             rx1, ry1, rx2, ry2 = r_box
45             r_cx, r_cy = (rx1 + rx2) / 2, (ry1 + ry2) / 2
46             r_area = (rx2 - rx1) * (ry2 - ry1)
```

```

45         y_diff = abs(l_cy - r_cy)
46         x_diff = l_cx - r_cx
47         area_ratio = min(l_area, r_area) / max(l_area, r_area)
48
49         if y_diff <= max_y_diff and min_x_diff <= x_diff <=
           max_x_diff and area_ratio >=
           size_similarity_threshold:
50             y_score = 1 - y_diff / max_y_diff
51             x_score = 1 - (x_diff - min_x_diff) / (max_x_diff
           - min_x_diff)
52             score = y_score * 0.5 + x_score * 0.4 + area_ratio
           * 0.1
53             cost_matrix[i, j] = 1 - score
54
55     row_ind, col_ind = linear_sum_assignment(cost_matrix)
56     matches = []
57     for i, j in zip(row_ind, col_ind):
58         if cost_matrix[i, j] < 0.99:
59             matches.append((i, j))
60     return matches
61
62 # ===== Automatic extreme points =====
63 def get_extreme_points_from_box(box):
64     x1, y1, x2, y2 = box
65     width, height = x2 - x1, y2 - y1
66     if width >= height:
67         left_point = (x1, (y1 + y2) / 2)
68         right_point = (x2, (y1 + y2) / 2)
69     else:
70         left_point = ((x1 + x2) / 2, y1)
71         right_point = ((x1 + x2) / 2, y2)
72     return left_point, right_point
73
74 # ===== Draw keypoints =====
75 def draw_keypoints(img, boxes):
76     img_viz = img.copy()
77     for box in boxes:
78         x1, y1, x2, y2 = map(int, box)
79         cv2.rectangle(img_viz, (x1, y1), (x2, y2), (0, 255, 0), 2)
80         left_point, right_point = get_extreme_points_from_box(box)
81         cv2.circle(img_viz, (int(left_point[0]), int(left_point
           [1])), 5, (255, 0, 0), -1)
82         cv2.circle(img_viz, (int(right_point[0]), int(right_point
           [1])), 5, (0, 0, 255), -1)
83         cv2.line(img_viz, (int(left_point[0]), int(left_point[1]))
           ,
84                 (int(right_point[0]), int(right_point[1])), (0,
           255, 255), 2)
85     return img_viz

```

```

86
87 # ===== Triangulation =====
88 def triangulate_point(P1, P2, pt_left, pt_right):
89     pts_left = np.array([[pt_left[0]], [pt_left[1]]], dtype=np.
90         float64)
91     pts_right = np.array([[pt_right[0]], [pt_right[1]]], dtype=np.
92         float64)
93     point_4d_hom = cv2.triangulatePoints(P1, P2, pts_left,
94         pts_right)
95     return (point_4d_hom[:3] / point_4d_hom[3]).flatten()
96
97 # ===== Manual Point Selection =====
98 manual_points = []
99 def click_event(event, x, y, flags, param):
100     global manual_points
101     if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
102         manual_points.append((x, y))
103         cv2.circle(param, (x, y), 5, (0, 0, 255), -1)
104         cv2.imshow("Manual Selection", param)
105
106 def get_manual_points_roi(image, box, num_points=2):
107     """
108     Show only ROI (bounding box) for manual point selection.
109     Convert clicks back to full-image coordinates.
110     """
111     global manual_points
112     manual_points = []
113
114     x1, y1, x2, y2 = map(int, box)
115     roi = image[y1:y2, x1:x2].copy()
116
117     # Resize to fit screen
118     screen_res = 1280, 720
119     scale_width = screen_res[0] / roi.shape[1]
120     scale_height = screen_res[1] / roi.shape[0]
121     scale = min(scale_width, scale_height)
122
123     window_width = int(roi.shape[1] * scale)
124     window_height = int(roi.shape[0] * scale)
125     resized = cv2.resize(roi, (window_width, window_height))
126
127     clone = resized.copy()
128     cv2.namedWindow("Manual Selection", cv2.WINDOW_NORMAL)
129     cv2.resizeWindow("Manual Selection", window_width,
130         window_height)
131
132 def click_event(event, x, y, flags, param):
133     global manual_points
134     if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:

```

```

131         # Map click back to ROI original coords
132         orig_x = int(x / scale) + x1
133         orig_y = int(y / scale) + y1
134         manual_points.append((orig_x, orig_y))
135         cv2.circle(param, (x, y), 5, (0, 0, 255), -1)
136         cv2.imshow("Manual Selection", param)
137
138     cv2.imshow("Manual Selection", clone)
139     cv2.setMouseCallback("Manual Selection", click_event, clone)
140
141     while len(manual_points) < num_points:
142         cv2.waitKey(1)
143
144     cv2.destroyAllWindows("Manual Selection")
145     return manual_points
146
147 def analyze_results(lengths_auto, lengths_manual):
148     # Guardar em DataFrame
149     df = pd.DataFrame({
150         "Fish_ID": range(1, len(lengths_auto)+1),
151         "Auto_mm": lengths_auto,
152         "Manual_mm": lengths_manual
153     })
154
155     # M t r i c a s
156     mae = mean_absolute_error(df["Manual_mm"], df["Auto_mm"])
157     rmse = np.sqrt(mean_squared_error(df["Manual_mm"], df["Auto_mm"]
158         "]))
159
160     rel_error = np.mean(np.abs((df["Auto_mm"] - df["Manual_mm"]) /
161         df["Manual_mm"])) * 100
162
163     print("\n==== Validation Results =====")
164     print(f"Mean Absolute Error (mm): {mae:.2f}")
165     print(f"Mean Squared Error (mm): {rmse:.2f}")
166     print(f"Mean Relative Error (%): {rel_error:.2f}")
167     print(f"Average length of Automatic: {np.mean(lengths_auto):.2f} mm")
168     print(f"Average length of Manual: {np.mean(lengths_manual):.2f} mm")
169
170     # Scatter plot Auto vs Manual
171     plt.figure(figsize=(6, 6))
172     plt.scatter(df["Manual_mm"], df["Auto_mm"], c='blue', label="Peixes")
173
174     max_len = max(df["Manual_mm"].max(), df["Auto_mm"].max()) * 1.1
175
176     plt.plot([0, max_len], [0, max_len], 'r--', label="y = x (ideal)")
177
178     plt.xlabel("Manual (mm)")

```

```

173     plt.ylabel("Autom tico (mm)")
174     plt.title("Compara o Auto vs Manual")
175
176     # Show number of fish
177     num_fish = len(df)
178     plt.text(0.05 * max_len, 0.95 * max_len, f"Total fish: {
        num_fish}", fontsize=12, color='green',
179             verticalalignment='top')
180
181     plt.legend()
182     plt.grid(True)
183     plt.show()
184
185     return mae, rmse, rel_error
186
187
188 # ===== Visualization 3D =====
189 def visualize_3d_points(points_3d, lengths_auto, lengths_manual):
190     fig = plt.figure(figsize=(10, 8))
191     ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
192
193     lines = [] # to store plotted lines for legend
194     labels = [] # to store corresponding labels
195
196     for i, (p1, p2) in enumerate(points_3d):
197         line, = ax.plot([p1[0], p2[0]], [p1[1], p2[1]], [p1[2], p2
198             [2]], 'o-',
199                       label=f'Fish {i+1} | Auto: {lengths_auto[i]
200                           :.1f} mm | Manual: {lengths_manual[i]
201                           :.1f} mm')
202         # Only add first 6 to legend
203         if i < 6:
204             lines.append(line)
205             labels.append(f'Fish {i+1} | Auto: {lengths_auto[i]:.1
206                 f} mm | Manual: {lengths_manual[i]:.1f} mm')
207
208     ax.set_xlabel('X (mm)')
209     ax.set_ylabel('Y (mm)')
210     ax.set_zlabel('Z (mm)')
211
212     # Custom legend with max 6 fish
213     ax.legend(lines, labels, bbox_to_anchor=(-0.25, 1), loc='upper
214         left', borderaxespad=0.)
215
216     plt.show()
217
218 # ===== Main =====
219 def main():
220     config = load_config("config.yaml")

```

```

216     K1, D1, K2, D2, R, T, P1, P2 = load_calibration(config['
           calibration_file'])
217     detector = YOLO(config['yolo_detection_model'])
218     CONF_THRESHOLD = config.get('confidence_threshold', 0.25)
219     MAX_LENGTH = config.get('max_length_mm')
220
221     left_img_paths = natsorted(glob(os.path.join(config['
           left_images_dir'], '*')))
222     right_img_paths = natsorted(glob(os.path.join(config['
           right_images_dir'], '*')))
223
224     all_3d_points, lengths_auto, lengths_manual = [], [], []
225
226     for idx, (l_path, r_path) in enumerate(zip(left_img_paths,
           right_img_paths), start=1):
227         left_img, right_img = cv2.imread(l_path), cv2.imread(
           r_path)
228         left_res, right_res = detector(left_img, conf=
           CONF_THRESHOLD)[0], detector(right_img, conf=
           CONF_THRESHOLD)[0]
229
230         left_boxes, right_boxes = left_res.bboxes.xyxy.cpu().numpy
           (), right_res.bboxes.xyxy.cpu().numpy()
231         print(f"[PAIR {idx}] Left boxes: {len(left_boxes)}, Right
           boxes: {len(right_boxes)}")
232         matches = match_detections_epipolar(left_boxes,
           right_boxes)
233         print(f"[PAIR {idx}] Matches: {matches}")
234
235         for i_left, i_right in matches:
236             # Print matched pair info
237             print(f"\n[PAIR] Left box {i_left} {left_boxes[i_left
           ]} <--> Right box {i_right} {right_boxes[i_right]}")
           )
238
239         # Automatico
240         l_left, l_right = get_extreme_points_from_box(
           left_boxes[i_left])
241         r_left, r_right = get_extreme_points_from_box(
           right_boxes[i_right])
242         left_3d, right_3d = triangulate_point(P1, P2, l_left,
           r_left), triangulate_point(P1, P2, l_right, r_right
           )
243         length_auto = np.linalg.norm(left_3d - right_3d)
244
245         # Manual (Utilizador escolhe pontos na imagem da
           esquerda e direita)
246         print(f"Selecione manualmente os extremos do peixe {
           idx} na imagem da esquerda (ROI)")

```

```
247     pts_left = get_manual_points_roi(left_img, left_boxes[
248         i_left])
249     print(f"Selecione manualmente os extremos do peixe {
250         idx} na imagem da direita (ROI)")
251     pts_right = get_manual_points_roi(right_img,
252         right_boxes[i_right])
253
254     left_manual_3d = triangulate_point(P1, P2, pts_left
255         [0], pts_right[0])
256     right_manual_3d = triangulate_point(P1, P2, pts_left
257         [1], pts_right[1])
258     length_manual = np.linalg.norm(left_manual_3d -
259         right_manual_3d)
260
261     # Filter by max length
262     if length_auto <= MAX_LENGTH and length_manual <=
263         MAX_LENGTH:
264         all_3d_points.append((left_3d, right_3d))
265         lengths_auto.append(length_auto)
266         lengths_manual.append(length_manual)
267         print(f"[RESULT] Fish {idx}: Auto = {length_auto
268             :.2f} mm | Manual = {length_manual:.2f} mm")
269     else:
270         print(f"[SKIP] Fish {idx}: Auto = {length_auto:.2f
271             } mm | Manual = {length_manual:.2f} mm (over 80
272             mm)")
273
274     if all_3d_points:
275         visualize_3d_points(all_3d_points, lengths_auto,
276             lengths_manual)
277         analyze_results(lengths_auto, lengths_manual)
278
279 if __name__ == "__main__":
280     main()
```

Listagem B.4: Algoritmo de Detecção e Validação de Medição Automática